

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**



PROYECTO FIN DE CARRERA

**MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL PLEGADO
DE LOS ACEROS INOXIDABLES
AUSTENÍTICOS**

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: MECÁNICA

Autor

ESTELA AMOR MARTÍN

Tutor

José Antonio Canteli Fernández

Leganés, Abril de 2009

A mis padres Juan Daniel y María
y hermanos Daniel y Sergio

Agradecimientos

En la vida nunca se sabe a ciencia cierta si los cambios van a ser para bien o para mal. Es una incertidumbre con la que se vive al principio, hasta que llega un momento en el que se ven todos tus esfuerzos recompensados y respiras aliviado. Me cambié de universidad con la sensación de haber estado perdiendo mi tiempo y por casualidad llegué aquí. Con miedo y con dedicación empecé mi nueva formación en esta universidad a la que le tengo tantas cosas que agradecer, los amigos, los compañeros, los días interminables con prácticas o en la biblioteca, tantos momentos que no se valoran en su día hasta que empiezas tu carrera profesional. Sin darte cuenta poco a poco vas madurando, formándote como persona y adquiriendo responsabilidades.

Este proyecto ha requerido más tiempo del que yo me había imaginado en un principio, por cuestiones académicas, personales o profesionales. Ha sido un camino largo que culmina hoy, un día muy importante para mí y esperado y deseado por todos.

Quiero agradecer a los míos, a los que me han brindado su apoyo, comprensión y sobre todo paciencia aunque no haya sido correspondido por mi parte como merecéis. Mis padres, Juan Daniel y María, mis hermanos, Daniel y Sergio, sólo os puedo decir una de las palabras más preciadas que existe, Gracias.

Al Departamento de Ingeniería Mecánica por haberme ofrecido la posibilidad de realizar este proyecto, y por la gran ayuda brindada a lo largo de él.

Tengo especial agradecimiento hacia mi profesor y tutor José Antonio Canteli Fernández. Gracias por el tiempo que me has dedicado, por tu comprensión y por tu paciencia. Y gracias sobre todo por tus consejos a nivel personal y profesional y por las charlas sobre asuntos fuera del ámbito del proyecto.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1. Objetivos del proyecto	4
1.2. Estructura del proyecto	5
1.3. Aceros inoxidables.....	6
1.4. Aceros inoxidables austeníticos.....	8
1.4.1. Propiedades Generales	8
1.4.2. Caracterización del material utilizado	10
1.5. Plegado.....	22
1.6. Modelos numéricos.....	32
1.7. Tipos de modelos numéricos	34
1.8 Modelos de elementos finitos	38
2. Creación del modelo	43
2.1. Condiciones iniciales	43
2.2. Geometrías	44
2.3. Mallado: descripción y criterios	49
2.4. Material	52
2.5. Condiciones de contorno (Movimientos y Fijaciones)	52
2.6. Otras condiciones.....	54
2.7. Elementos de contacto	57
2.8. Simulación	60
2.9. Resultados del modelo con todas las condiciones Standard.....	65
2.9.1. Velocidad de deformación máxima a 90°	69
2.9.2. Fuerza.....	71
2.9.3. Recuperación	74
2.9.4. Tensiones	77
2.9.5. Deformaciones	78
3. Sensibilidad del modelo.....	79
3.1. Sensibilidad del modelo al tamaño de los elementos	79
3.2. Sensibilidad del modelo al Módulo de elasticidad o Módulo de Young	84
3.3. Sensibilidad del modelo a σ - ϵ	90
3.4. Sensibilidad del modelo al coeficiente de rozamiento μ	96
3.5. Sensibilidad del modelo al radio de punta	99
3.6. Sensibilidad del modelo al ancho de la chapa	102
3.7. Sensibilidad del modelo al espesor de la chapa	106
3.8. Análisis de resultados	109
4. Optimización del modelo.....	113
4.1. Optimización del modelo.....	113
4.2. Comparación de resultados.....	116
5. Conclusiones	117
6. Trabajos futuros	118
7. Bibliografía	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Recuperación chapa. Springback	2
Figura 1.2: probeta normalizada	11
Figura 1.3: Ejemplo de ensayo de tracción.....	12
Figura 1.4: Curva tensión-deformación.....	13
Figura 1.5: Diagrama tensión-deformación usual en ingeniería.....	15
Figura 1.6: Valores ingenieriles de Tensión-Deformación para un ensayo con una probeta de 4mm de espesor.....	20
Figura 1.7: Valores verdaderos de Tensión-Deformación para un ensayo con una probeta de 4mm de espesor.....	20
Figura 1.8: laminación en frío. Chapas de espesor menor o igual a 3mm.....	23
Figura 1.9: Recuperación chapa.....	23
Figura 1.10: prensa plegadora (Referencia Loire, S.A.F.E.).....	24
Figura 1.11: Utillaje estándar (Referencia Puma-systems, Mecos).....	25
Figura 1.12: Plegado al aire sobre matriz en forma de V.....	26
Figura 1.13: Parámetros geométricos básicos de plegado al aire con matriz en U.....	26
Figura 1.14: Influencia de la dirección de laminado en plegado.....	28
a) Dirección de laminado favorable para plegado.....	28
b) Dirección de laminado menos favorable para plegado.....	28
Figura 1.15: Recuperación elástica o springback en el proceso de plegado.....	30
Figura 1.16: Diferencias Finitas.....	36
Figura 1.17: Elementos finitos.....	36
Figura 1.18: Ejemplo modelo 3D.....	39
Figura 1.19: Mallado.....	40
Figura 1.20: Postprocesado.....	41
Figura 1.21: Modelado dinámico.....	42
Figura 1.22: Modelado de ensamblajes.....	42
Figura 2.1: Geometría chapa estándar.....	45
Figura 2.2: Geometría apoyos estándar.....	45
Figura 2.3: Conjunto chapa-apoyos estándar.....	46
Figura 2.4: Distintos radios de punta (Fuente: Mecos Ibérica SL).....	47
Figura 2.5: Macho con radio de punta de 1,5mm.....	47
Figura 2.6: Geometría conjunto estándar.....	48
Figura 2.7: Mallado en chapa.....	50
Figura 2.8: Condiciones densidad de malla en chapa.....	51
Figura 2.9: Condición de movimiento en el macho.....	53
Figura 2.10: Análisis geometría.....	55
Figura 2.11: Zonas de contacto entre elementos.....	57
Figura 2.12: Condiciones de contacto. Valor de fricción y tolerancia.....	58
Figura 2.13: Nodos dentro de la banda de tolerancia.....	59
Figura 2.14: Fallo en la generación de condiciones de contacto.....	59
Figura 2.15: Información guardada en cada paso o step.....	61
Figura 2.16: Vista del último paso o step.....	62
Figura 2.17: Información de cada step obtenida durante la simulación.....	63
Figura 2.18: Ejemplo mensaje de hora de comienzo y finalización de una simulación.....	64
Figura 2.19: Modelo con las condiciones estándares.....	66
Figura 2.20: Modelo estándar a los 87°.....	66
Figura 2.21: Cálculo del ángulo que forma la chapa estándar.....	67

Figura 2.22: Modelo estándar una vez subido el macho.....	68
Figura 2.23: Curvas tensión-deformación según la velocidad de deformación.....	69
Figura 2.24: Curva tensión-deformación real introducida en DEFORM 2D.	70
Figura 2.25: Velocidad máxima de deformación.....	71
Figura 2.26: Curva Fuerza- Desplazamiento DEFORM 2D.....	72
Figura 2.27: Extracción resultados de cada step sin interpolar.....	72
Figura 2.28: Curva Fuerza-Desplazamiento interpolada.	73
Figura 2.29: Ángulo previo cercano a los 87°.....	74
Figura 2.30: Elección de puntos para el cálculo del ángulo inicial	75
Figura 2.31: Cálculo del ángulo inicial chapa estándar	76
Figura 2.32: Tensiones máximas	77
Figura 2.33: Valores de deformaciones máximas.....	78
Figura 3.1: Elementos de la chapa en el caso estándar, 1000 elementos.....	80
Figura 3.2: Visualización de la chapa con 2000 elementos.....	80
Figura 3.3: Curva Fuerza-Desplazamiento en el ensayo de 2000 elementos	81
Figura 3.4: Gráfica Fuerza-Desplazamiento para 2000 elementos interpolada.....	82
Figura 3.5: Sensibilidad al modelo al número de elementos	82
Figura 3.6: Curva Carga-Desplazamiento para E=180GPa.....	85
Figura 3.7: Curva interpolada Carga-Desplazamiento para E=180GPa.....	86
Figura 3.8: Curva Carga-Desplazamiento para E=220GPa.....	87
Figura 3.9: Curva interpolada Carga-Desplazamiento para E=220GPa.....	87
Figura 3.10: Sensibilidad del modelo al módulo de elasticidad o módulo de Young	88
Figura 3.11: Curvas material con una disminución del 10% en tensión.....	91
Figura 3.12: Curvas Material estándar.....	92
Figura 3.13: Curva Carga-Desplazamiento variando σ 10%	93
Figura 3.14: Curva Fuerza-Desplazamiento .xls	94
Figura 3.15: Variación del caso estándar con $\mu=0,3$	96
Figura 3.16: Curva fuerza-desplazamiento con $\mu=0,3$	97
Figura 3.17: Geometría con diámetro de punta de 3mm y de 5mm	99
Figura 3.18: Curva fuerza-desplazamiento para un radio de punta de 5mm	100
Figura 3.19: Ancho de chapa de menor longitud que ancho de la matriz.....	102
Figura 3.20: Simulación con un ancho de chapa de 100mm	104
Figura 3.21: Influencia del ancho de la chapa en la fuerza de plegado	105
Figura 3.22: Gráfico de fuerzas con espesor de chapa de 4,4mm y abertura 32mm	106
Figura 3.23: Gráfico de fuerzas con espesor de chapa 4,4mm y abertura 35,2mm.....	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Composición química acero AISI-304.	10
Tabla 1.2: Propiedades mecánicas del acero inoxidable austenítico AISI-304.	16
Tabla 2.1: Sistema de Unidades DEFORM 2D.	43
Tabla 3.1: Variación de la fuerza de plegado con el número de elementos	83
Tabla 3.2: Valores de Fuerza máxima al variar el módulo de elasticidad	89
Tabla 3.3: Valores de Fuerza máxima al variar la resistencia del material	94
Tabla 3.4: Valores de fuerza máxima al variar el coeficiente de rozamiento.....	98
Tabla 3.5: Influencia del radio de punta en la fuerza máxima de plegado	101
Tabla 3.6: Influencia del ancho de chapa en la fuerza de plegado	103
Tabla 4.1: Comparación resultados Reales-Estándar	116
Tabla 4.2: Comparación resultados Reales-Estándar Optimizados.....	116



1. Introducción

El plegado es un proceso de conformación por deformación de chapas. La chapa a conformar se sitúa sobre una matriz donde es deformada por el empuje que se realiza sobre ella, por medio de un macho o punzón accionado por la parte móvil de una prensa-plegadora.

El proceso de conformado de chapa metálica se ha ido adaptando al paso del tiempo y a las nuevas tecnologías. Empezando con plegados manuales y pasando a las más modernas técnicas de plegado bajo máquinas prensas-plegadoras de control numérico en las que automáticamente calcula la fuerza necesaria a aplicar teniendo en cuenta varios parámetros. Por tanto ha **evolucionado** desde los antiguos sistemas rígidos y convencionales por otros sistemas de mayor tecnología y flexibilidad.

Este espectacular avance de la industria ha sido posible debido a la **automatización de los procesos industriales**. Todo ello ha sido posible gracias a una serie de factores entre los que se encuentran:

- Las nuevas tecnologías en el campo mecánico.
- La introducción de los ordenadores.
- La evolución de los sistemas de control y regulación.

Estos elementos llevan consigo un gran esfuerzo en su desarrollo acompañado de una reducción de costes, aumento en la producción y mejora del producto.

Las necesidades del mercado han ido exigiendo a los productos entre otras características:

- Una **variedad** de modelos cada vez mayor, pasando de grandes series a medias y pequeñas series.
- Una **vida del producto corta**, que exige cambios continuos en el sistema de fabricación.
- Una **reducción** de los plazos de entrega, que hace que se acorten los plazos de entrega del producto y por tanto el ciclo de producción.
- Un producto de alta **calidad** en relación con las exigencias del cliente.
- Y un **precio** cada vez más bajo, para que el producto sea competitivo, lo que obliga a la reducción de costes.

Tenemos por tanto el concepto de fabricación flexible, que obliga a los sistemas de fabricación a la producción de piezas muy diferentes, tanto en su forma geométrica, como en la cantidad y tipo de operaciones a realizar para su obtención, de tal forma que los tiempos de fabricación sean mínimos.

En la industria el plegado tiene un papel muy destacado debido a su gran adaptación a las nuevas tecnologías, versatilidad y su amplia aplicación en numerosas áreas, tales como la industria automovilística, electrónica y aeronáutica. Tenemos por tanto plegado realizado en plegadoras flexibles, que permiten obtener todo tipo de plegados dentro de un área determinada trabajando materiales de distintos espesores.

Dentro de las distintas formas de plegado, el plegado al aire (utilizado en este proyecto) lleva consigo los conceptos de *flexibilidad*, *eficacia* y *eficiencia*.

El ángulo de plegado se puede controlar mediante el recorrido del macho o punzón, pudiendo, por tanto, poder plegar chapas a distintos ángulos de plegado sin necesidad de cambiar las herramientas. Esto está directamente ligado a la posible reducción de costes.

La precisión del producto está relacionada de forma directa con la **recuperación del material** (springback). Esta recuperación del material es debida a la recuperación **elástica** de la chapa. Es decir, es el retorno parcial que sufre la chapa hacia su posición inicial cuando deja de emplearse la fuerza aplicada. Este hecho se tiene que tener en cuenta en el ángulo de plegado final, teniendo que asignar ángulos de plegado más acentuados para la obtención del ángulo final en el producto. Por ejemplo, en un acero inoxidable austenítico se tiene una recuperación en torno al 4%, por tanto se tendrá que plegar hasta llegar aproximadamente a un ángulo de 87° para poder obtener un ángulo de alrededor de 90°.

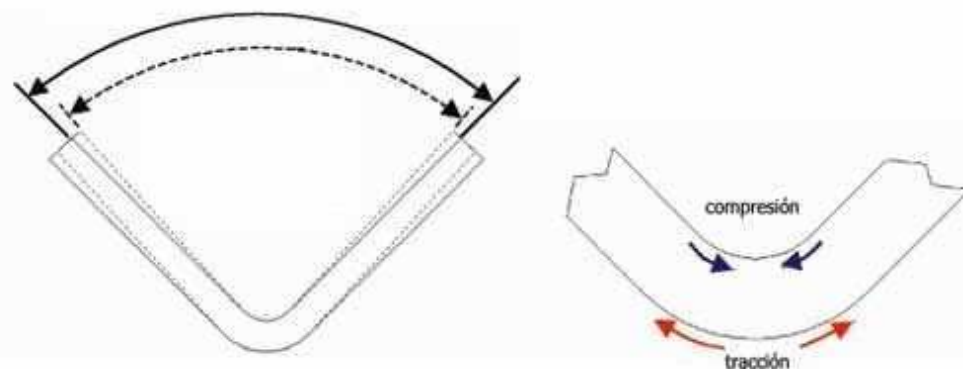


Figura 1.1: Recuperación chapa. Springback

El springback o recuperación de la chapa es función esencialmente de:

- Espesor de la chapa, abertura de la matriz
- Ángulo de plegado
- Tipo de material
- Módulo de Young y límite elástico del material
- Tratamiento térmico anterior al proceso de plegado



Por tanto para poder predecir la recuperación de la chapa, es necesario tener información del material que se va a emplear. Las propiedades mecánicas y el comportamiento del mismo.

En el apartado 1.4 se habla del acero inoxidable austenítico AISI-304 usado en la realización de este proyecto. A parte de comentar sus propiedades físicas, también se da información acerca de las propiedades mecánicas.



1.1. Objetivos del proyecto

El objetivo de este proyecto es la obtención y validación de un modelo de elementos finitos que simule el proceso físico de plegado de chapa a temperatura ambiente.

Para la obtención de los resultados de los ensayos reales nos basaremos en ensayos ya realizados en el Dpto. de Ingeniería Mecánica sobre plegado con temperatura distribuida de los aceros inoxidables austeníticos. Por tanto, tomaremos de dichos ensayos los resultados a temperatura ambiente de las fuerzas además de los datos de los ensayos realizados para la caracterización del material.

Para ello, se estudiará la posibilidad de representar con un programa de elementos finitos (DEFORM2D) las condiciones de ensayo.

Una vez obtenidos los resultados se procederá a la optimización del modelo de elementos finitos que reproduzca lo más fielmente posible los ensayos realizados.

Si la validación del programa de elementos finitos es positiva tendremos una potente herramienta para el estudio de distintos casos de plegado, lo que se reproduce en una reducción de los costes, ya que no sería necesaria la realización de los ensayos de forma física. Esta reducción se ve incrementada ya que muchos de los programas de elementos finitos que existen en el mercado, entre ellos DEFORM 2D, tienen una biblioteca genérica de materiales en los que se han tenido en cuenta los distintos ensayos de caracterización del material para su realización.



1.2. Estructura del proyecto

La parte inicial del proyecto consistirá en la introducción al proceso de conformación de chapas mediante el proceso de plegado. Se presentará en esta primera parte información acerca del material usado y su caracterización para la obtención de las propiedades mecánicas. Para ello se realizarán ensayos de tracción sobre probetas del material (AISI-304). Esta información se utilizará para simular lo más fielmente posible, el comportamiento de la chapa ante sollicitaciones externas como las fuerzas de plegado a las que se verá sometida para obtener un ángulo de doblado concreto.

La segunda parte del proyecto estará destinada al estudio y posibilidades que ofrece el programa de elementos finitos usado DEFORM2D para la modelización y representación del proceso de plegado de chapa.

Para la modelización por elementos finitos se intentará introducir en el programa las condiciones de cargas y de contorno que intervienen en el plegado de la forma más cercana a las condiciones reales de ensayo. Por tanto es importante destacar que el modelado es una idealización del sistema físico real y, salvo en muy pocas excepciones, un análisis por elementos finitos no proporciona la solución exacta. No obstante, confeccionando un modelo apropiado se pueden obtener unas soluciones suficientemente precisas, estando siempre dentro de un margen de error pequeño. Los cálculos necesarios deben completarse de forma que se permita la construcción, análisis y modificación de un problema en un tiempo razonable. Los resultados tienen que ser correctos y ser obtenidos de forma eficaz, ya que el tiempo es una variable muy destacada y apreciada en la sociedad actual.

El modelo inicial se realizará con unas condiciones elegidas como estándar. Se analizarán factores que intervienen en el plegado y cómo afecta al proceso la variación de los mismos. Por tanto se realizará el análisis de:

- Sensibilidad del modelo al tamaño de los elementos
- Sensibilidad del modelo al módulo de elasticidad o módulo de Young
- Sensibilidad del modelo a σ - ϵ
- Sensibilidad del modelo al coeficiente de rozamiento
- Sensibilidad del modelo al radio de punta del macho
- Sensibilidad del modelo al ancho de la chapa
- Sensibilidad del modelo al espesor de la chapa

Una tercera parte del proyecto está destinada a la optimización del modelo de elementos finitos para el máximo acercamiento a los resultados obtenidos en los ensayos reales.

Se realizará una comparación de los ensayos reales y el modelo realizado con los parámetros estándar y el material. La optimización del modelo se realizará por medio de ajuste de parámetros y comparación con los resultados reales.



1.3. Aceros *inoxidables*

Los **aceros inoxidables** son aleaciones a base de hierro, cromo, carbono y otros elementos, principalmente, níquel, molibdeno, manganeso, silicio, titanio, etc. que les confiere una resistencia particular a algunos tipos de corrosión, además de ofrecer buena resistencia mecánica y tener buenas características para su transformación.

Se utilizan en múltiples aplicaciones de la industria, arquitectura, química y bienes de consumo. Son seleccionados como materiales de ingeniería por su excelente resistencia a la corrosión en muchos medios.

La resistencia a la corrosión en los aceros inoxidables se debe a su alto contenido en cromo. Para hacer un acero inoxidable “limpio” se debe asegurar la presencia de al menos un 12% de cromo (Cr) en el acero. El cromo forma un óxido superficial que protege la subyacente aleación de hierro-cromo de la corrosión. Para producir el óxido protector, el acero inoxidable debe estar expuesto a agentes oxidantes.

En general, hay **cuatro tipos básicos** o principales de aceros inoxidables:

- Ferríticos
- Martensíticos
- Austeníticos
- Endurecidos por precipitación

Aceros Inoxidables Ferríticos. Son esencialmente aleaciones binarias hierro-cromo que contienen de un 12% a un 30% de cromo. Se llaman ferríticos ya que su estructura permanece en su mayor parte ferrítica (cúbica centrada en el cuerpo BCC, hierro de tipo α) en condiciones normales de tratamiento térmico. No pueden templarse con tratamientos térmicos y sólo pueden endurecerse moderadamente por deformación en frío.

Son magnéticos, ofrecen buena ductilidad y buena resistencia a la corrosión y oxidación. Resisten mejor la corrosión que los martensíticos y pueden calentarse sin oxidarse hasta 1.150 grados centígrados. Los aceros inoxidables ferríticos son relativamente bajos de coste, ya que no contienen níquel. Principalmente se utilizan como materiales de construcción generales en los que se requiere resistencia al calor y a la corrosión.

Aceros Inoxidables Martensíticos. Se denominan así por admitir el temple y quedar con estructura martensítica cuando están bien templados. Contienen del 13% al 17% de cromo y del 0% al 2% de níquel, con porcentajes de carbono variables desde el 0,08% al 0,60%. Se pueden temprar por tratamientos térmicos. Son magnéticos y resisten la corrosión de ácidos débiles (la resistencia a la corrosión de estos aceros es relativamente pobre comparada con los austeníticos y ferríticos) y la oxidación hasta temperaturas de 700 grados centígrados. Tienen una ductilidad bastante buena, y algunos se pueden tratar térmicamente con una resistencia a tracción que excede los 1.379 MPa.



Aceros Inoxidables Austeníticos. Son esencialmente aleaciones terciarias de hierro-cromo-níquel conteniendo entre un 16% y un 25% de cromo, y desde un 7% a un 20% de níquel junto a porcentajes más pequeños de otros como molibdeno, silicio, wolframio, etc. Estas aleaciones se llaman austenitas porque su estructura recuerda la austenita (cúbica centrada en caras FCC, hierro tipo γ) en todas temperaturas normales de tratamiento térmico. La presencia de níquel (Ni), que posee una estructura cristalina FCC, permite obtener la estructura FCC a temperatura ambiente.

La *elevada conformabilidad* de estos aceros austeníticos es debida a su estructura cristalina FCC. En este tipo de estructura se forman muchos planos compactos que hacen que exista tanta deformabilidad. Las imperfecciones, y en especial, las dislocaciones lineales (que se mueven en los planos compactos) explican que al deformar un metal, aumente la resistencia (**acritud**). La acritud es endurecimiento por deformación en frío. Cuando nos encontramos con alguna dislocación anclada, el resto de dislocaciones no pueden moverse, provocándose tensiones internas. Cuesta más trabajo mover las dislocaciones acumuladas que pueden llegar a provocar grietas.

Los aceros inoxidables del grupo austenítico tienen composiciones y propiedades diferentes, pero muchas características comunes. Poseen, normalmente, mejor resistencia a la corrosión que los ferríticos y martensíticos, porque los carburos pueden ser retenidos en soluciones sólidas por enfriamiento rápido a altas temperaturas.

Se pueden temprar por deformación en frío, pero no por tratamiento térmico. En su condición de recocido son todos, en esencia, no magnéticos, aunque algunos puedan iniciar un poco de imantación al trabajarlos en frío. Ofrecen una excelente resistencia a la corrosión, muy buena ductilidad (son los más dúctiles de todos los aceros inoxidables), y una mayor dureza como resultado de su deformación en frío.

Los aceros inoxidables endurecidos por precipitación. Contienen cromo y níquel además de cobre, aluminio, titanio o molibdeno. Estos aceros inoxidables proporcionan alta resistencia y tenacidad manteniendo, al mismo tiempo, buenas características de resistencia a la corrosión.



1.4. Aceros inoxidables austeníticos

1.4.1. Propiedades Generales

Los aceros inoxidables que contienen más de un 7% de Níquel se llaman **austeníticos**, ya que tienen una estructura metalográfica en estado recocido, formada básicamente por austenita y de aquí adquieren el nombre. El contenido de **Cromo** varía de 16 a 28%, el de **Níquel** de 3.5 a 22% y el de **Molibdeno** 1.5 a 6%. No son magnéticos en estado recocido y, por tanto, no son atraídos por un imán.

Los aceros inoxidables austeníticos se pueden endurecer por deformación, pasando su estructura metalográfica a contener **martensita**. Se convierten en parcialmente magnéticos, lo que en algunos casos dificulta el trabajo en los artefactos eléctricos.

A todos los aceros inoxidables se les puede añadir un pequeño porcentaje de molibdeno, para mejorar su resistencia a la corrosión por cloruros. El molibdeno es introducido como elemento de aleación en los aceros inoxidables precisamente para disminuir la corrosión. La presencia de molibdeno permite la formación de una capa pasiva más resistente.

Este tipo de acero inoxidable es el más utilizado por su amplia variedad de propiedades.

Las propiedades básicas son:

- Excelente resistencia a la corrosión
- Excelente factor de higiene -limpieza
- Fáciles de transformar
- Excelente soldabilidad
- No se endurecen por tratamiento térmico
- Se pueden utilizar tanto a temperaturas criogénicas como a elevadas temperaturas.

Tienen gran aplicación en las industrias químicas, farmacéuticas, de alcohol, aeronáutica, naval, uso en arquitectura, alimenticia, y de transporte. Es también utilizado en cubiertos, vajillas, piletas, revestimientos de ascensores y en un sin número de aplicaciones.

Los aceros inoxidables que llevan molibdeno son de gran utilización en las industrias químicas, de alcohol, petroquímicas, de papel y celulosa, en la industria petrolífera, industrias textil y farmacéutica.

Las zonas térmicamente afectadas por operaciones de soldado son particularmente sensibles a la corrosión, ya que durante el ciclo térmico de soldado parte del material es mantenido en la franja crítica de temperaturas.



La consideración de este fenómeno llevó al desarrollo de los inoxidables austeníticos extra bajo carbono, en los cuales el tenor de carbono es controlado en un máximo de 0,03%, quedando así extremadamente reducido la posibilidad de sensibilización.

La utilización de estabilizadores tiene también la finalidad de evitar el problema de la sensibilización. El titanio, adicionado como elemento de aleación, inhibe la formación de carburo de cromo debido al hecho de tener una afinidad mayor por el carbono que aquella que tiene el cromo. Así, se precipita carburo de titanio y el cromo permanece en solución sólida. Con la misma finalidad puede ser utilizado el niobio.

Tanto el titanio como el niobio son estabilizadores del carbono y los aceros inoxidables así obtenidos, son conocidos como aceros inoxidables estabilizados. Se utilizan para aplicaciones en equipos que operan entre 400 y 900°C, los aceros inoxidables estabilizados son los más recomendados, ya que conservan mejores propiedades mecánicas en esas temperaturas que los aceros de extra bajo carbono; notoriamente la resistencia al creep.

En el inoxidable (20Cr-25Ni-4,5Mo-1,5Cu), la adición de elementos de aleación busca mejorar no sólo la resistencia al picado sino también la resistencia a la corrosión en medios ácidos reductores. El elevado tenor de níquel mejora también el comportamiento frente a la corrosión bajo tensión.

En los casos en que se pretende una buena resistencia mecánica y no existe gran preocupación por la corrosión intergranular, los aceros inoxidables, con tenores de carbono en el rango de 0,04/0,10%, son recomendados. La precipitación de una fina red de carburos de cromo, tan perjudicial bajo el punto de vista de la corrosión, se torna benéfica cuando lo que interesa son las propiedades mecánicas.

Aumentos considerables en los tenores de cromo y níquel permiten elevar la temperatura de formación de cascarilla (escamado) de los aceros inoxidables austeníticos. El inoxidable es recomendado para trabajo al aire libre, a temperaturas inferiores a 925 °C en servicios continuos. En las mismas condiciones, el inoxidable, con cromo 24/26% y níquel 19/22%, resiste temperaturas de hasta 1150°C. Es un material clasificado como acero inoxidable refractario.

Grandes aumentos de níquel, llevan a las aleaciones Ni-Cr-Fe, donde el elemento con mayor presencia en el material ya no es el hierro sino el níquel, Estos materiales no son conocidos como aceros inoxidables sino como aleaciones a base de níquel y presentan excelente resistencia a la corrosión en diversos medios a altas temperaturas. El elevado tenor de níquel da también garantía de una buena resistencia a la corrosión bajo tensión.

Con un aumento del tenor de azufre con la finalidad de mejorar la maquinabilidad. La ductilidad y la resistencia a la corrosión quedan comprometidas por este aumento en la cantidad de azufre.



En este proyecto se ha escogido el acero **inoxidable austenítico AISI-304** (Instituto Americano de la siderurgia, American Iron and Steel Institute). Este acero es esencialmente una aleación terciaria de hierro-cromo-níquel (Fe-Cr-Ni) con una composición nominal del 18% de cromo (Cr) y 8% de níquel (Ni). Es la aleación más usada de los austeníticos. La elevada conformabilidad de este acero es debida a su estructura cristalina FCC, como ya se ha comentado anteriormente.

La conformabilidad es la propiedad que asegura el éxito de una operación de deformación plástica cualquiera, en este caso el plegado. Es una de las propiedades que más interesa, aparte del costo a usuarios y fabricantes de chapa metálica para plegado. El cromo (Cr) es el elemento de la aleación que le da su cualidad de resistencia a la corrosión. A medida que la cantidad de níquel (Ni) aumenta, el acero presenta una menor acritud durante su elaboración por deformación plástica.

Este acero no se puede endurecer con tratamientos térmicos, pero se puede aumentar su resistencia por deformación en frío (**acritud**) y de esta forma presenta unas excelentes propiedades mecánicas. Tiene una **alta resistencia y límite elástico**, al mismo tiempo que retiene su **buena ductilidad y dureza**, por lo que se ampliamente usado en aplicaciones y diseños.

Elemento	% en peso	Elemento	% en peso
C	≤ 0,0070	Cr	17,00-19,50
Si	≤ 1,00	Cu	-
Mn	≤ 2,00	Mo	-
P _{máx}	0,045	Nb	-
S	≤ 0,015	Ni	8,00-10,50
N	≤ 0,11	Ti	-

Tabla 1.1: Composición química acero AISI-304.

1.4.2. Caracterización del material utilizado

Para la caracterización del material utilizado se hace el ensayo de tracción, que es uno de los más empleados y se realiza para determinar las propiedades mecánicas de los materiales.

Los resultados del ensayo de tracción se llevan a una gráfica llamada **diagrama tensión-deformación** característico de cada material, que nos da información del comportamiento típico del material y de las propiedades mecánicas.

Ensayo de tracción

El **ensayo de tracción** de un material consiste en someter a una probeta normalizada realizada con dicho material a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la *rotura de la probeta*.

La probeta en el ensayo de tracción se sostiene por los dos extremos, a la vez que una fuerza de tracción se aplica a velocidad constante; obteniéndose la curva tensión-deformación. Las dimensiones de la probeta obedecen a la norma ASTM-E 8M.

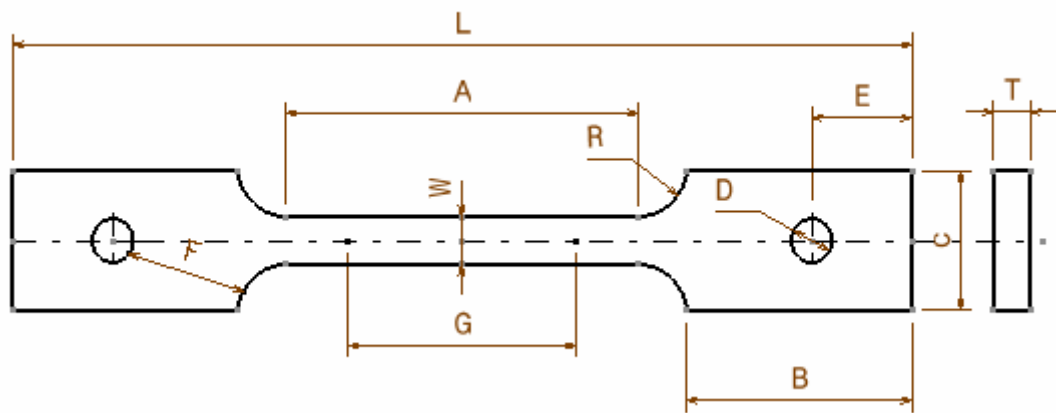


Figura 1.2: probeta normalizada



Figura 1.3: Ejemplo de ensayo de tracción.

En un **ensayo de tracción** pueden determinarse diversas características de los materiales elásticos:

- **Módulo de elasticidad ó Módulo de Young**, cuantifica la rigidez del material.
- **Coefficiente de Poisson**, que cuantifica la razón entre el alargamiento longitudinal y el acortamiento de las longitudes transversales a la dirección de la fuerza.
- **Límite de fluencia o límite elástico aparente**, valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la cedencia o fluencia. La fluencia es la deformación permanente de un componente bajo carga estática mantenida durante un período de tiempo. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada.
- **Límite elástico** (límite elástico convencional o práctico), valor de la tensión a la que se produce un alargamiento prefijado de 0,2%.
- **Carga de rotura o resistencia a la tracción**, carga máxima resistida por la probeta dividida por la sección inicial de la probeta.
- **Alargamiento de rotura**, incremento de longitud que ha sufrido la probeta. Se mide entre dos puntos cuya posición está normalizada y se expresa en tanto por ciento.
- **Estricción**, es la reducción de la sección que se produce en la zona de la rotura.

Curva tensión-deformación

En el ensayo se mide la deformación (alargamiento) de la probeta entre dos puntos fijos de la misma, a medida que se incrementa la carga aplicada y se representa gráficamente en función de la tensión (carga aplicada dividida por la sección de la probeta). En general, la curva tensión-deformación así obtenida presenta 4 zonas diferenciadas:

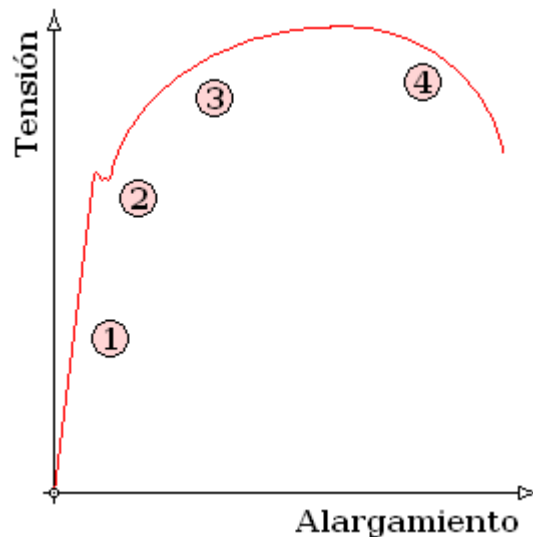


Figura 1.4: Curva tensión-deformación.

La secuencia de deformación consiste inicialmente en una deformación proporcional a la carga, *comportamiento elástico*, en el que el material recupera su longitud original una vez que la carga se retira. Al deformarse el material se produce un alargamiento y en consecuencia una disminución uniforme de la sección transversal a la dirección de la tracción. Es la *estricción uniforme*.

La figura 1.4 muestra la curva tensión-deformación y sus distintas zonas que pasamos a describir a continuación:

1. Deformaciones elásticas: En esta zona las deformaciones se reparten a lo largo de la probeta y son de pequeña magnitud y si se retirara la carga aplicada la probeta recuperaría su forma inicial. El coeficiente de proporcionalidad entre la tensión y la deformación se denomina *módulo de elasticidad o de Young* y es característico del material. Así, todos los aceros tienen el mismo módulo de elasticidad aunque sus resistencias puedan ser muy diferentes. La tensión más elevada que se alcanza en esta región se denomina límite de fluencia y es el que marca la aparición de este fenómeno. Pueden existir dos zonas de deformación elástica la primera recta y la segunda curva siendo el límite de proporcionalidad el valor de la tensión que marca la transición entre ambas. Generalmente, este último valor es muy difícil de determinar y se define entonces un *límite elástico* (Yield stress) como el punto del diagrama tensión-deformación en el que la tensión se corresponde con el 0,2% de deformación.



Se obtiene trazando una recta paralela al tramo proporcional (recto) con una deformación inicial igual a 0,2%. Por encima de este valor, el material se deforma de manera permanente.

2. Fluencia o cedencia. Es la deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada. El fenómeno de fluencia se da cuando las impurezas o los elementos de aleación bloquean las dislocaciones de la red cristalina impidiendo su deslizamiento, mecanismo mediante el cual el material se deforma plásticamente. Alcanzado el límite de fluencia se logra liberar las dislocaciones produciéndose la deformación bruscamente. La deformación en este caso también se distribuye uniformemente a lo largo de la probeta pero concentrándose en las zonas en las que se ha logrado liberar las dislocaciones (bandas de Luders). No todos los materiales presentan este fenómeno en cuyo caso la transición entre la deformación elástica y plástica del material no se aprecia de forma clara.

3. Deformaciones plásticas: Si se retira la carga aplicada en dicha zona la probeta recupera sólo parcialmente su forma, es decir, recupera la parte elástica quedando deformada permanentemente. Las deformaciones en esta región son más acusadas que en la zona elástica.

4. Estricción. Llegado un punto del ensayo, las deformaciones se concentran en la parte central de la probeta apreciándose una acusada reducción de la sección de la probeta, momento a partir del cual las deformaciones continuarán acumulándose hasta la rotura de la probeta por esa zona. La estricción es la responsable del descenso de la curva tensión-deformación; realmente las tensiones no disminuyen hasta la rotura, sucede que lo que se representa es el cociente de la fuerza aplicada (creciente) entre la sección inicial y cuando se produce la estricción la sección disminuye, efecto que no se tiene en cuenta en la representación gráfica, ya que se representa la tensión ingenieril. Los materiales frágiles no sufren estricción ni deformaciones plásticas significativas rompiéndose la probeta de forma brusca. Terminado el ensayo se determina la carga de rotura, carga última o resistencia a la tracción, la máxima resistida por la probeta dividida por su sección inicial, el alargamiento en (%) y la estricción en la zona de la rotura.

Como se ha comentado, la relación de tensión a deformación en la zona elástica se conoce como **Módulo de elasticidad (E)**. Es una medida de la inclinación de la curva y por tanto de la **rigidez** del material. Cuanto mayor sea el valor de E, más alta será la carga necesaria para deformar el material en una misma cantidad.

Otras características que pueden caracterizarse mediante el ensayo de tracción son la resiliencia y la tenacidad que son respectivamente la energía elástica y total absorbida y que vienen representadas por el área comprendida bajo la curva tensión-deformación hasta el límite elástico en el primer caso y hasta la rotura en el segundo.

Por tanto y como resumen, las **propiedades mecánicas** que son de importancia en ingeniería y que pueden ser obtenidas del ensayo de tracción son:

- Módulo de elasticidad (E): relación de tensión a deformación en la zona elástica. Es una medida de la inclinación de la curva y por tanto de la rigidez del material. Esta relación se define a través de la ley de Hooke:

$$E = \frac{\sigma(\text{tensión})}{\varepsilon(\text{deformación})} [Pa]$$

- Límite elástico convencional a 0,2% de deformación (σ_e): tensión correspondiente a 0,2% de deformación. A partir de este valor la deformación es plástica.
- Resistencia última a tracción (σ_u): carga necesaria por unidad de sección para producir la rotura del material ensayado. Si la muestra desarrolla una disminución localizada (garganta o estricción) la tensión usual en ingeniería disminuirá con la deformación hasta que se produzca la rotura. Cuanto más dúctil es un metal, más se alargará la muestra antes de la rotura.
- Alargamiento porcentual: La cantidad de alargamiento que un muestra experimenta durante la prueba, proporcionando un valor de la ductilidad del metal.

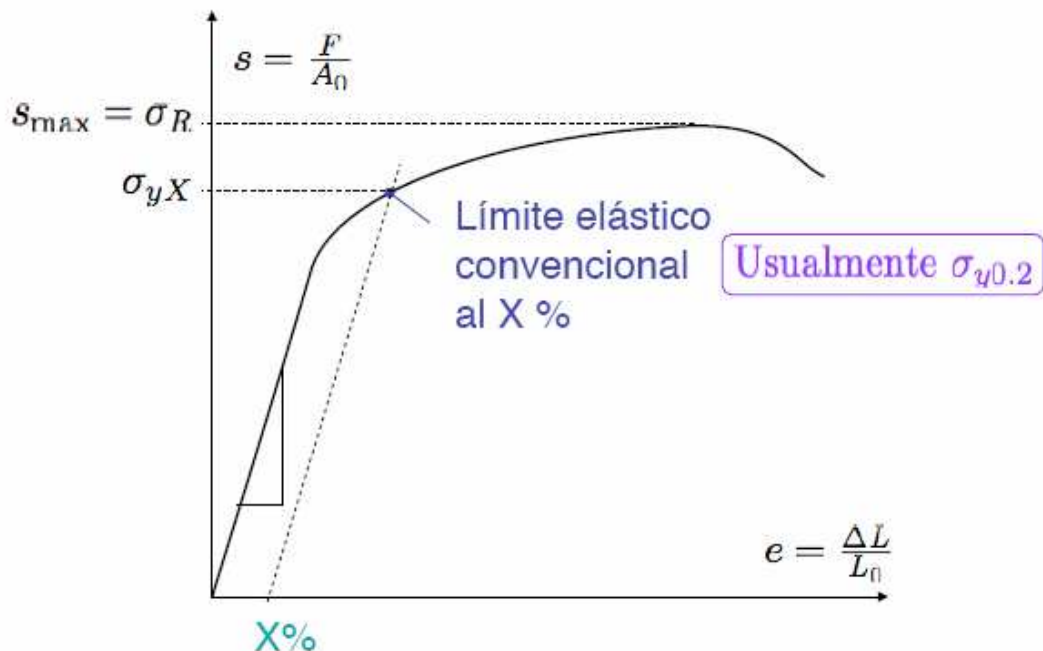


Figura 1.5: Diagrama tensión-deformación usual en ingeniería.



Ductilidad

La ductilidad se conoce como la extensión de la deformación plástica del material antes de la rotura. Es decir, la cantidad de alargamiento que una muestra extensible experimenta durante al prueba de tracción proporciona un valor de la ductilidad de un metal. En general, a mayor ductilidad (cuanto más deformable es el metal) mayor es el porcentaje de alargamiento. Se mide como sigue:

$$\% \text{alargamiento} = \frac{\text{LongitudFinal} - \text{LongitudInicial}}{\text{LongitudInicial}} \times 100$$

Siendo:

Longitud inicial: longitud entre la marca de calibración sobre la muestra antes de la prueba.

Longitud final: longitud entre esa misma marca de calibración después de la prueba cuando se unen las superficies fracturadas de la muestra.

El porcentaje de alargamiento a la fractura es de importancia no sólo como medida de ductilidad, sino también como un índice de la calidad del metal. Si hay porosidad o inclusiones en el metal o si ha ocurrido un daño debido, por ejemplo, a un sobrecalentamiento, el porcentaje de alargamiento de la muestra disminuirá por debajo de lo normal.

La siguiente tabla recoge algunas de las propiedades mecánicas del acero inoxidable austenítico AISI-304.

Módulo de Young [Pa]	Límite elástico [MPa]	Tensión de rotura [MPa]	Porcentaje de alargamiento [%]
1,9E11-2,1E11	230	550-760	45

Tabla 1.2: Propiedades mecánicas del acero inoxidable austenítico AISI-304.

Fuente: “Los aceros inoxidables”- Grupinox Agrupación de empresas para la comercialización y servicio de aceros inoxidables)

El **módulo de elasticidad a tracción y compresión** son equivalentes y rondan en torno a 200GPa. El **módulo elástico a la torsión** está alrededor de los 76-78 GPa, y el **coeficiente de Poisson** varía entre los valores 0,26 y 0,30 (valor absoluto de la relación de la deformación lateral a la longitudinal).

El acero AISI.304 está sujeto al fenómeno de **acritud** para alcanzar valores pertinentes de carga de rotura y límite elástico, manteniendo valores relativamente elevados de alargamiento (buena ductilidad) y estricción. La acritud provoca una reducción del módulo de elasticidad. Al aumentar la acritud, aumenta la permeabilidad magnética del acero.



Las propiedades expuestas anteriormente se obtienen a partir del diagrama tensión-deformación usual en ingeniería (Figura 1.5), donde la tensión se calculaba dividiendo la fuerza aplicada F sobre la probeta por el área de su sección original A_0 . El área de la sección de la muestra a ensayar varía *continuamente* durante la prueba de tracción, el cálculo de la tensión no puede ser preciso. Durante la prueba, después de darse la estricción de la muestra, la tensión decrece a medida que aumenta la deformación, obteniéndose un valor máximo en el diagrama. Por tanto, una vez que comienza la estricción, la *tensión real* es mayor que la tensión en ingeniería.

Se define **tensión verdadera o real** como la fuerza aplicada F sobre la probeta dividida por el valor *real o verdadero* del área transversal de la probeta A_i . Por tanto, tanto la fuerza como el área deben ser medidos continuamente durante el ensayo de tracción. El área se mide a través de un extensómetro colocado en la zona calibrada de la probeta y bajo la hipótesis de conservación del volumen antes y después del ensayo.

$$\sigma_{real} = \frac{F}{A_i} [Pa]$$

Hipótesis, constante el volumen de la sección de la longitud de calibración:

$$G \cdot A_0 = G_i \cdot A_i \rightarrow G_i = G \cdot \frac{A_0}{A_i}$$

Siendo,

G = longitud calibrada original

G_i = longitud calibrada correspondiente a una carga F_i

La **deformación real o verdadera** se evalúa como la suma de los alargamientos diferenciales dividida por la longitud de la fibra o filamento:

$$\varepsilon_{real} = \int_G^{G_i} \frac{dg}{g} = \ln \frac{G_i}{G}$$



Sustituyendo el valor de G_i obtenido de la hipótesis de volumen constante se obtiene:

$$\varepsilon_{real} = \ln \frac{A_0}{A_i}$$

Siendo,

A_0 = Área inicial de la sección transversal

A_i = Área de la sección transversal correspondiente a una carga F_i

De este modo se puede construir un diagrama **tensión-deformación verdadera o real** situando en el eje de ordenadas el valor de la tensión real y en el de abscisas la deformación real correspondiente.

Partiendo del diagrama tensión-deformación usual en ingeniería proporcionado por el ensayo de tracción, se puede relacionar la tensión ingenieril (σ) con la tensión real (σ_{real}) y la deformación ingenieril (ε) con la deformación real (ε_{real}).

La relación entre deformación ingenieril (ε) y la deformación real (ε_{real}) se obtiene como sigue:

$$\varepsilon = \frac{G_i - G}{G} = \frac{G_i}{G} - 1 \Rightarrow \varepsilon + 1 = \frac{G_i}{G}$$

Y así de la ecuación anterior obtenemos:

$$\varepsilon_{real} = \ln(\varepsilon + 1)$$

Una relación similar puede deducirse entre la tensión ingenieril (σ) y la tensión real (σ_{real}):

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{y} \quad \sigma_{real} = \frac{F}{A_i}$$

Puesto que:

$$A_i = A_0 \frac{G}{G_i}$$



Tenemos que:

$$\sigma_{real} = \frac{F}{A_i} = \frac{F}{A_0(G/G_i)} = \sigma \frac{G_i}{G} = \sigma(\varepsilon + 1)$$

Al comparar la curva tensión-deformación real e ingenieril para una misma probeta se advierte que la curva real presenta valores mayores que la curva ingenieril. Esto es debido a que en la curva real la tensión va aumentando al ir disminuyendo la sección de la probeta.

Los diseños en ingeniería no están basados en el esfuerzo real a la fractura, ya que tan pronto como el límite elástico es rebasado, el material comienza a deformarse. Los ingenieros utilizan en su lugar el límite elástico convencional al 0,2 por 100 de desplazamiento para diseños estructurales con los convenientes factores de seguridad.

Sin embargo, en procesos tecnológicos como plegado de chapa es imprescindible conocer la curva tensión-deformación real del material, ya que durante toda la operación, la chapa se verá sometida a grandes deformaciones en el campo plástico.

Los resultados de los ensayos reales han sido sustraídos de estudios del Departamento de Ingeniería Mecánica. En dichos estudios se desarrolla una herramienta para calcular y mostrar los valores característicos resultantes del plegado con *temperatura distribuida*. Para ello se han plegado chapas de acero inoxidable austenítico a temperatura ambiente y a altas temperaturas. También se han desarrollado modelos analíticos y numéricos para simular el calentamiento y el proceso de plegado, y los resultados reales de los ensayos valieron para validar dichos modelos. Además se desarrolló una herramienta informática para aplicar los resultados de la modelización en centros de ingeniería y fabricación.

Como se acaba de comentar, en los estudios realizados por el departamento se hicieron distintos ensayos de plegado de chapas de acero inoxidable austenítico a temperatura ambiente y a altas temperaturas. En el presente proyecto se han abstraído algunos de los ensayos reales realizados a temperatura ambiente.

Se realizaron ensayos con distintos espesores: 2, 3, 4 y 6mm y con distinto sentido de laminación respecto a la probeta: Longitudinal y Transversal. El departamento llegó a la conclusión, después de un estudio, de anisotropía en el material. Por tanto, no se distingue entre la dirección de laminación para la aparición de grietas.

Nosotros tomaremos los datos obtenidos para el espesor de 4mm y la abertura de la matriz de valor $v = 8e = 32\text{mm}$.

Para los ensayos a temperatura ambiente se obtienen las siguientes curvas:

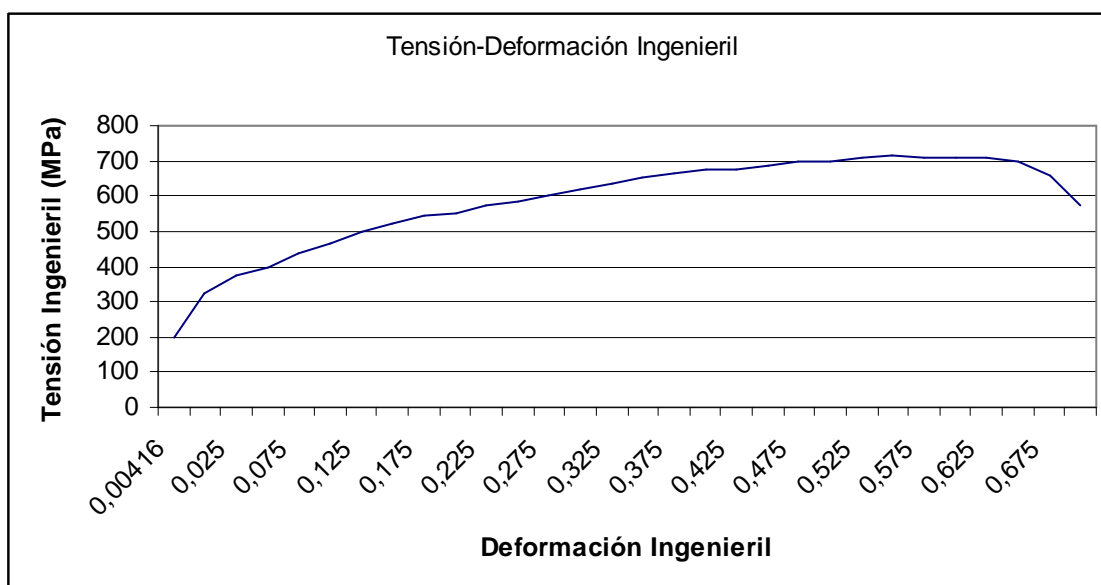


Figura 1.6: Valores ingenieriles de Tensión-Deformación para un ensayo con una probeta de 4mm de espesor.

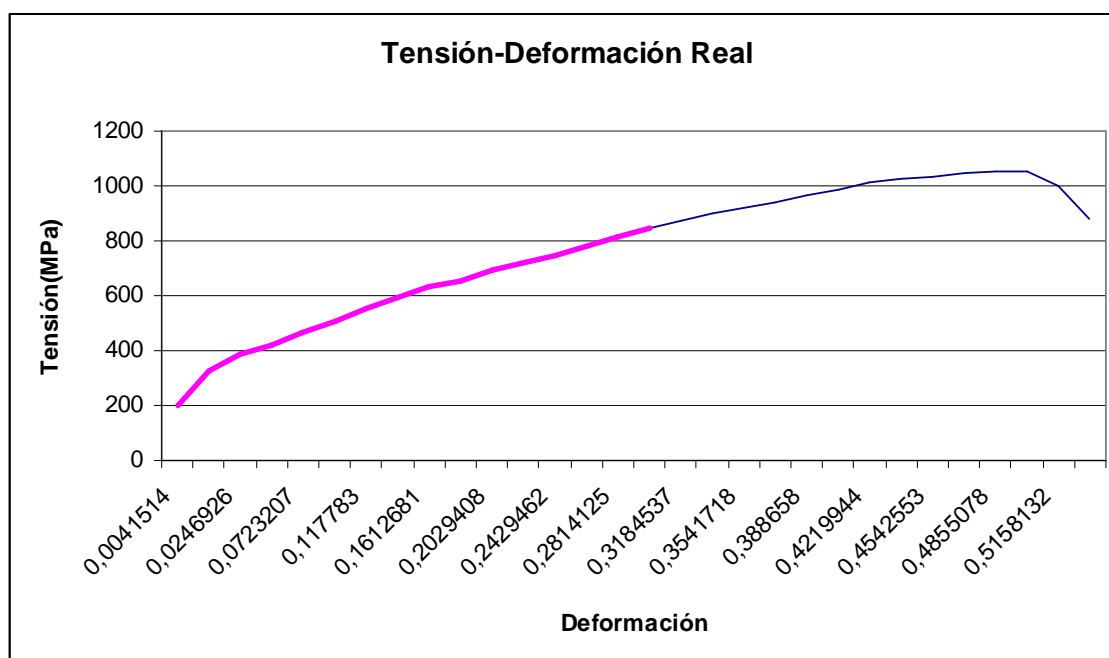


Figura 1.7: Valores verdaderos de Tensión-Deformación para un ensayo con una probeta de 4mm de espesor.



En esta última curva, se suprimen los valores correspondientes a la estricción del material dado que, desde un punto de vista funcional la determinación del lugar donde se produce es aleatoria y los valores de la sección durante esa parte del ensayo no están bajo control, conociendo únicamente un punto correspondiente a la sección final medida después de la rotura.



1.5. Plegado

La conformación de chapas es un proceso de fabricación muy extendido dentro de la industria. El proceso de conformación emplea en general, operaciones donde el esfuerzo cortante sobre el material es predominante, como las de punzonado, cizallado, etc. Y operaciones donde los esfuerzos prioritarios son los de tracción y/o compresión y/o flexión como embutición, cintrado, perfilado, plegado, etc.

La mayor parte de la producción se centra en la conformación de materiales metálicos y dentro de éstos, metales en forma de láminas denominados chapas, clasificadas en chapas gruesas y chapas finas. Las primeras tienen un espesor superior a 3mm y las segundas igual o inferior.

Para las chapas gruesas se reserva generalmente un destino estructural, mientras que para las chapas finas su aplicación más extendida es la de carenado, aunque, como en las carrocerías de automóvil puede tener la doble aplicación.

Por otra parte las aplicaciones generales de los aceros inoxidables son muy amplias destacando: arquitectura, industria alimentaria, sector doméstico, bienes de consumo de larga duración, elementos de unión. Industria química, industria nuclear, industria del papel, mobiliario urbano, transportes, aplicaciones criogénicas, productos sanitarios, medio ambiente, etc.

El proceso original de fabricación de las chapas es por laminación. Al partir de tochos muy gruesos se entiende que los enormes esfuerzos que se producen en este proceso, obligan a trabajar el material en caliente aprovechando sus más favorables características mecánicas en este estado.

Es para espesores bajos, generalmente inferiores a 3mm, cuando el material se trabaja en frío, lo que implica mayor número de pasadas en los cilindros del tren de laminación para una misma reducción relativa de espesor, unos mayores esfuerzos mecánicos, una mejora notable en las características mecánicas y una enorme mejora en el acabado superficial de la chapa.



Figura 1.8: laminación en frío. Chapas de espesor menor o igual a 3mm.

Este proyecto va encaminado al proceso de conformación por plegado, caracterizado por doblar la chapa en una línea recta, un cierto ángulo, con pequeños radios de curvatura en el acuerdo de las dos superficies planas formadas. La parte exterior de la chapa en la zona curvada queda sometida a tracción y la parte interior a compresión debiendo en todos los casos quedar exenta de grietas después del proceso.

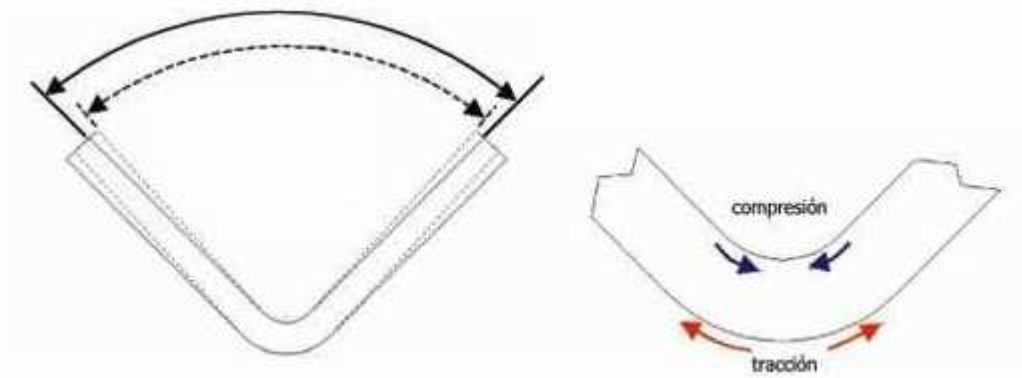


Figura 1.9: Recuperación chapa.

El proceso se realiza en máquinas denominadas prensas-plegadoras en las que la chapa a plegar se coloca sobre una matriz, caracterizada por tener una sección transversal con forma de U o de V, sobre la que se hace descender coplanarmente un macho con forma de V que empuja la chapa entre la abertura de la matriz.

Según la carrera de descenso la chapa resulta con un ángulo de plegado determinado por esta carrera de descenso y la recuperación del material.

Actualmente las máquinas prensas plegadoras van regidas por programas de control numérico. Automáticamente calculan el recorrido que debe hacer el macho para el material en cuestión para la obtención del ángulo final teniendo en cuenta la recuperación del material.



Figura 1.10: prensa plegadora (Referencia Loire, S.A.F.E.).

Las matrices usadas pueden tener una geometría muy variada dependiendo de la forma final que se necesite obtener. Esto mismo ocurre con la geometría de los machos o punzones. Dependiendo del ángulo final de plegado o si se va a realizar una secuencia de varios plegados de forma automática, la geometría de los machos puede variar de forma sustancial.

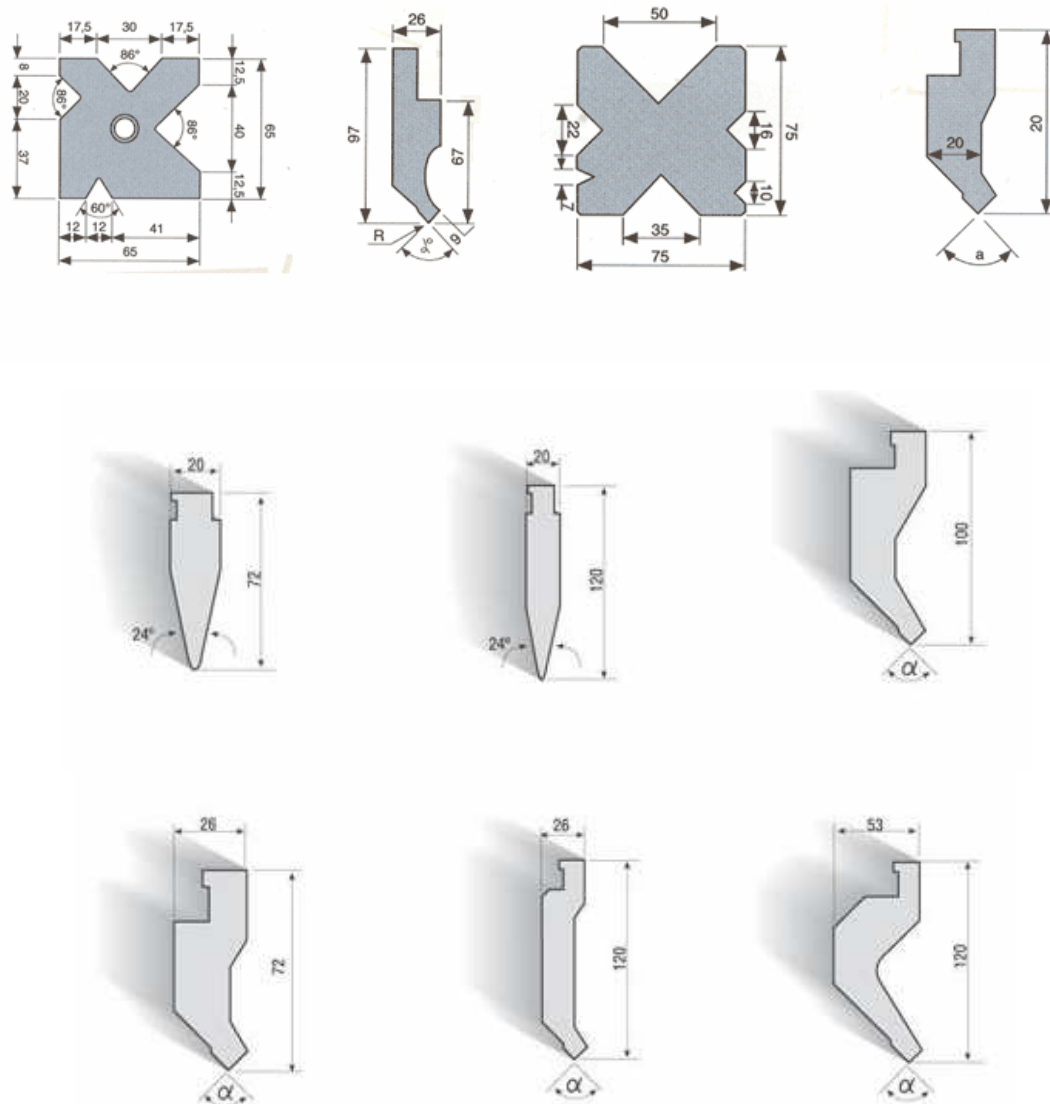


Figura 1.11: Utillaje estándar (Referencia Puma-systems, Mecos).

La figura 1.12 muestra de forma esquemática el proceso de plegado, en el cual la chapa se sitúa sobre una matriz y es presionada por un punzón hasta alcanzar un ángulo especificado. La distancia que el punzón entra en la matriz determina dicho ángulo. El punzón es accionado por la máquina originando la deformación plástica de la pieza.

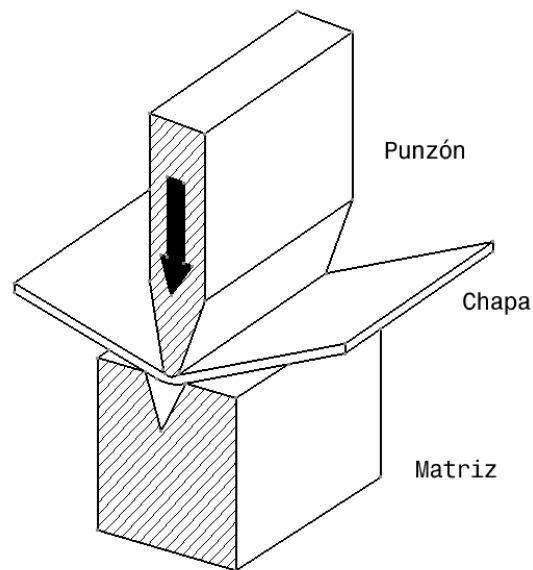
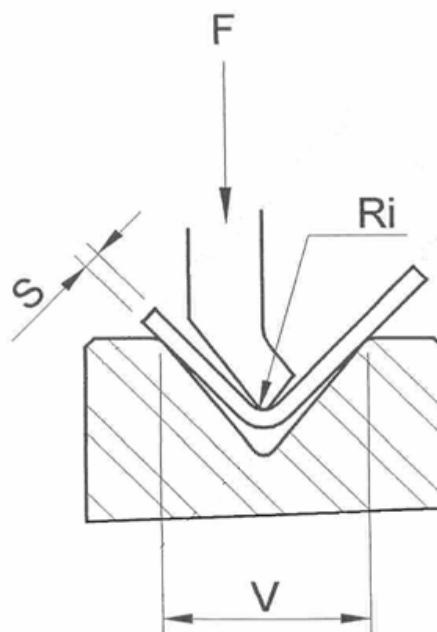


Figura 1.12: Plegado al aire sobre matriz en forma de V.

Los parámetros geométricos básicos en el proceso de plegado que se representan en la Figura 1.13 son:

- s : Espesor de la chapa
- r : Radio de plegado
- r_i : Radio de punzón
- v : Abertura de la matriz



*Figura 1.13: Parámetros geométricos básicos de plegado al aire con matriz en U
Principios básicos de plegado.*



La pieza de trabajo se sitúa sobre la matriz y es presionado por el macho o punzón, accionado por la prensa-plegadora, originando la **deformación plástica de la chapa**.

La zona interior de la chapa se ve sometida a compresión mientras que la zona exterior se ve afectada por tracción, generándose un **gradiente de tensiones** (tracción-compresión) a lo largo del espesor de la chapa que va disminuyendo hacia la línea neutra en la que no se experimenta ninguna de las dos tensiones.

Debido al **efecto Poisson**, el ancho de la pieza en la región exterior es menor que en la región interior siendo éste último mayor que el ancho original de la pieza. Este efecto influiría en que no se tendría deformación plana. Debido a que en el estudio de este proyecto tenemos que la longitud de la chapa es mucho mayor que el espesor de la misma, se cumple, por tanto, el estado de deformación plana.

La distancia que el punzón entra en la matriz determina el **ángulo de plegado**.

El **radio de plegado (R)** es siempre superior que el radio del punzón (r) en el plegado al aire, si no fuera así se produciría un gap entre el punzón y la chapa.

El **ancho de la matriz (v)** es función del espesor de la pieza a plegar. Es un factor que condiciona la fuerza necesaria para producir la deformación plástica, cuanto más pequeño sea el ancho, más fuerza será requerida.

La **longitud de la pieza (L)** a plegar está limitada por las dimensiones de la prensa-plegadora.

La deformación se realiza normalmente en frío, es decir a temperatura ambiente.

Factores que afectan al plegado

La capacidad de deformación disminuye al aumentar el límite elástico de los materiales. Se requiere mayor potencia para poder llegar a conformarlos. Esto da lugar a grietas y a incrementar la recuperación elástica o springback.

Cuando se produce una similitud de valores entre el límite elástico y la resistencia última a tracción tenemos un material poco dúctil y el rango de trabajo es más estrecho siendo probable la aparición de grietas.

Una vez el material ha sido doblado, se ve sometido a un efecto de **endurecimiento por acritud**. Esto puede producir tensiones residuales en la zona de plegado. Un aliviado de tensiones mediante un tratamiento térmico reduce el nivel de esfuerzos, evita la aparición de grietas y el fenómeno de corrosión bajo tensiones.

La **anisotropía** u orientación preferible de los granos debido al alineamiento de las dislocaciones, impurezas, etc. influye en la capacidad de deformación. Se adquiere durante la laminación, que es el proceso general para la fabricación de chapas metálicas.

El plegado se realiza perpendicularmente a la dirección de laminado (dirección de la fibra) con el fin de disminuir las tensiones y evitar la formación de grietas.

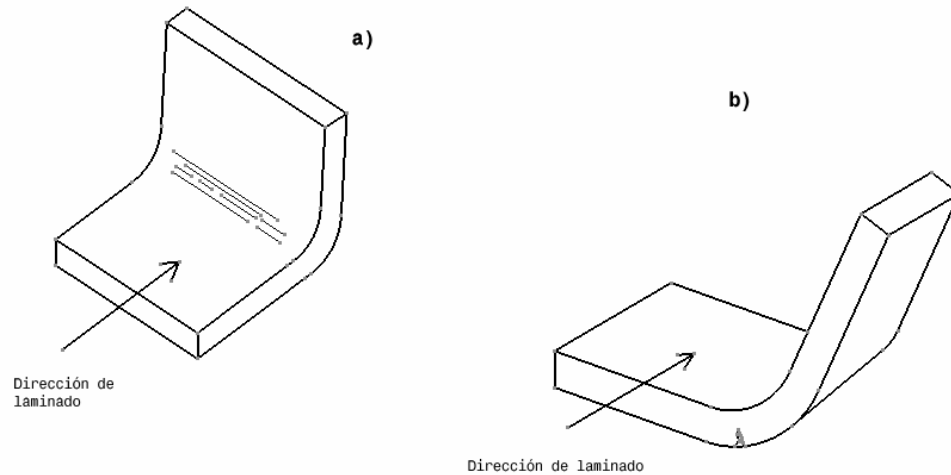


Figura 1.14: Influencia de la dirección de laminado en plegado.
a) Dirección de laminado favorable para plegado.
b) Dirección de laminado menos favorable para plegado.

Si la chapa presenta marcas o muescas deben ser eliminadas antes de proceder a cualquier proceso de conformación.

Debe haber una uniformidad en el espesor y en las propiedades de la chapa, ya que puede afectar al proceso de conformado.

Recuperación elástica o springback

Debido a que todos los materiales tienen un módulo de elasticidad finito, la deformación plástica es seguida de una recuperación del material cuando la carga desaparece. Este retorno parcial al cesar la fuerza se conoce como **springback o recuperación elástica**.

De forma aproximada se puede calcular la recuperación elástica según el radio inicial (R_i) y el radio final (R_f):

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \cdot \left(\frac{R_i \sigma_e}{Eg} \right) - 3 \cdot \left(\frac{R_i \sigma_e}{Eg} \right) + 1$$



Siendo:

σ_e : Límite elástico
E: Módulo de Young
G: Espesor de la chapa
 R_i : Radio inicial
 R_f : Radio final

Fuente ecuación: "Manufacturing Engineering and Technology". Serope Kalpakjian

Otra forma de cálculo del springback es la que sigue:

$$SB = \frac{\hat{A} - \hat{A}_b}{\hat{A}_b}$$

\hat{A} : ángulo de la chapa después de la recuperación elástica
 \hat{A}_b : ángulo que forma la herramienta de plegado
Ambos parámetros en grados °

Fuente ecuación: "Fundamentals of modern manufacturing. Materials, processes and systems"
Mikell P. Groover. Ed Prentice Hall.

De forma general, la recuperación elástica aumenta al incrementarse la relación $\frac{\text{radiodoblado}}{\text{espesor}}$, el límite elástico y al disminuir el módulo de elasticidad y disminuye al aumentar la temperatura de deformación.

Este fenómeno no se puede eliminar completamente por lo que habrá que asignar ángulos de plegado más acentuados de forma que las piezas pueden al final conseguir el ángulo deseado al cesar la acción deformante.

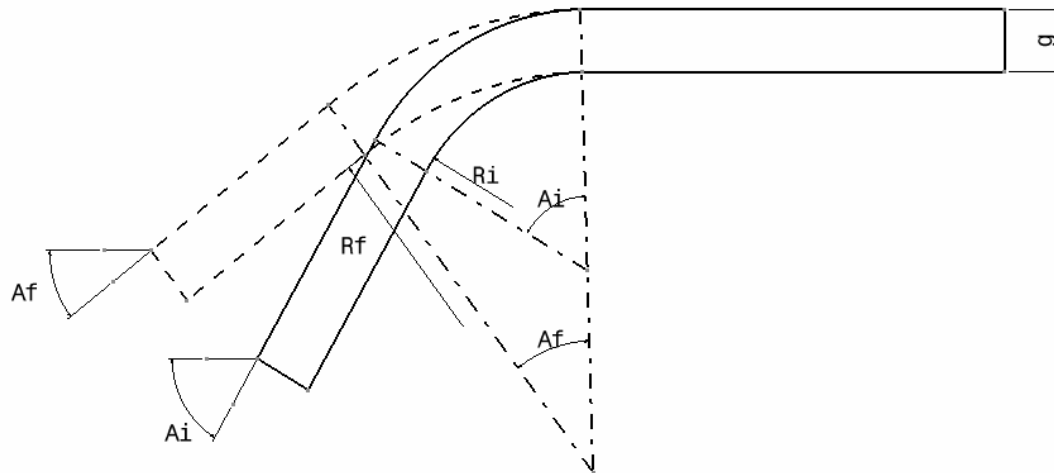


Figura 1.15: Recuperación elástica o springback en el proceso de plegado.

Fuerza máxima de plegado

Las fuerzas de plegado (F) pueden ser estimadas suponiendo que el proceso se corresponde con un plegado simple en una viga rectangular. Dicha fuerza va a depender del límite último a tracción del material (σ_u), la longitud de plegado (L), el espesor de la chapa (g) y de la abertura de la matriz (v).

Se tienen que dar las siguientes condiciones:

- Plegado al aire
- Superficie de los radios de repliegue del útil interior y superficie de la chapa limpias
- Ancho de la matriz superior al espesor, $v \approx 8g$
- No tener en cuenta la fricción

$$F_{\max} = c_1 \cdot \frac{g^2 \sigma_u L}{v}$$

Siendo “ c_1 ” un coeficiente que depende, entre otros parámetros, del espesor de la chapa (g) y de la abertura de la matriz (v).

Un valor típico para la constante “ c_1 ” para el plegado en V es $c_1=1,33$ Fuente: “Fundamentals of modern manufacturing Materials, processes and systems” Mikell P. Groover. Ed Prentice Hall.



La fuerza de plegado varía con la bajada del punzón. En plegado al aire, la fuerza se incrementa de cero hasta su valor máximo ($F_{\text{máx}}$) y luego decrece debido a la reducción sucesiva de espesor en la zona de plegado.



1.6. Modelos numéricos

El Análisis numérico es una rama de las matemáticas cuyos límites no son del todo precisos. De una forma rigurosa, se puede definir como la disciplina ocupada de describir, analizar y crear algoritmos numéricos que nos permitan resolver problemas matemáticos, en los que estén involucradas cantidades numéricas, con una precisión determinada.

En el contexto del cálculo numérico, un algoritmo es un procedimiento que nos puede llevar a una solución aproximada de un problema mediante un número finito de pasos que pueden ejecutarse de manera lógica. En algunos casos, se les da el nombre de métodos constructivos a estos algoritmos numéricos.

Desde este punto de vista, el análisis numérico proporcionará todo el andamiaje necesario para llevar a cabo todos aquellos procedimientos matemáticos susceptibles de expresarse algorítmicamente, basándose en algoritmos que permitan su simulación o cálculo en procesos más sencillos empleando números.

Existe una clasificación en tres categorías de problemas, atendiendo a su naturaleza o motivación para el empleo del cálculo numérico:

- 1) Problemas de tal complejidad que no poseen solución analítica.
- 2) Problemas en los cuales existe una solución analítica, pero ésta, por complejidad u otros motivos, no puede explotarse de forma sencilla en la práctica.
- 3) Problemas para los cuales existen métodos sencillos pero que, para elementos que se emplean en la práctica, requieren una cantidad de cálculos excesiva; mayor que la necesaria para un método numérico.

En general se trata de problemas que requieren una importante carga computacional para poder obtener una solución y por tanto es necesario generar o bien un algoritmo o bien un modelo capaz de transformar un problema sin solución analítica en una aproximación lo suficientemente buena como para ser de utilidad.

A partir de aquí, aparece un conjunto de conceptos adicionales:

Error: Este concepto aparece en dos formas,

- como consecuencia de la naturaleza finita de los sistemas de cálculo que solo pueden operar con números representados de forma finita.
- como resultado de haber aplicado un modelo finito a un problema de tipo infinito.



Esto genera que el resultado final *difiera del esperado en la realidad*, siendo el error un parámetro que permite determinar bajo qué condiciones un método numérico es adecuado. En algunos casos este error es cuantificable analíticamente, mientras que en una gran mayoría de las veces será necesario comprobar la *diferencia* entre el resultado obtenido y resultados de experimentos directos.

Estabilidad: Muchas de las operaciones matemáticas pueden llevarse adelante a través de la generación de una serie de números que a su vez alimentan de nuevo el algoritmo (realimentación).

En cada iteración se obtienen nuevos datos que servirán para el cálculo de la siguiente, aproximando el resultado a la solución final. El problema ocurre en determinar hasta cuándo deberá continuar con el ciclo, dado que es posible que en vez de llegar a una solución nos encontremos con que nos estamos alejando de ella. Algunas de las posibles causas de inestabilidad son:

- Problemas en los que las condiciones iniciales dan como resultado una realimentación positiva que deriva en una oscilación.
- Problemas en los que la precisión buscada sea muy elevada y próxima a la precisión de la máquina utilizada, resultando en una acumulación de errores numéricos de precisión y cálculo que hacen que la solución difiera de la realidad.

Representación de los datos: los algoritmos requieren de un modelado de los datos de entrada que haga que estos sean compatibles con la solución propuesta. Los conceptos matemáticos, tales como los números, vectores, polinomios, requieren una representación que permita su manipulación, principalmente convirtiéndolos en números bien sean en punto fijo o coma flotante.

En general, el principal campo de aplicación de estos métodos es cuando se necesita un valor numérico como solución a un problema matemático, y los procedimientos "exactos" o "analíticos" (manipulaciones algebraicas, teoría de ecuaciones diferenciales, métodos de integración, etc...) son incapaces de dar una respuesta. Debido a ello, son procedimientos de uso frecuente en el ámbito de la física y la ingeniería, y cuyo desarrollo se ha visto favorecido por la necesidad de éstos de obtener soluciones, aunque la precisión no sea completa. Debe recordarse que la física experimental, por ejemplo, nunca arroja valores exactos sino intervalos que engloban la gran mayoría de resultados experimentales obtenidos, ya que no es habitual que dos medidas del mismo fenómeno arrojen valores exactamente iguales.

Otro motivo que ha propiciado el auge del análisis numérico ha sido el desarrollo de los ordenadores. El aumento brutal de la potencia de cálculo ha convertido en posibles y en eficientes a algoritmos poco dados a su realización.



1.7. Tipos de modelos numéricos

Los problemas de esta disciplina se pueden dividir en dos grupos fundamentales:

* *Problemas de dimensión finita*: aquellos cuya respuesta son un conjunto finito de números, como las ecuaciones algebraicas, los determinantes, los problemas de valores propios, etc.

* *Problemas de dimensión infinita*: problemas en cuya solución o planteamiento intervienen elementos descritos por una cantidad infinita de números, como integración y derivación numéricas, cálculo de ecuaciones diferenciales, interpolación, etc.

Algunos métodos numéricos clásicos son:

- * Método de Monte Carlo
- * Resolución numérica de ecuaciones no lineales
- * Resolución numérica de sistemas de ecuaciones lineales
- * Resolución numérica de sistemas de ecuaciones no lineales
- * Interpolación
- * Interpolación polinómica de Lagrange
- * Interpolación polinómica de Hermite
- * Interpolación trigonométrica
- * Interpolación mediante funciones lineales a trozos
- * Derivación numérica
- * Integración numérica
- * Problemas de valores propios
- * Resolución numérica de ecuaciones diferenciales lineales y no lineales
- * Método de Bisección o de la bisectriz
- * Método de iteración de punto fijo
- * Método de Newton-Raphson
- * Método de la secante
- * Método de la posición falsa
- * Método de Steffensen
- * Método de Neville

De todos ellos vamos a hacer especial mención de los métodos usados para la resolución de ecuaciones en forma diferencial e integral, dado su importancia dentro del campo de la ingeniería.

Muchos de los problemas clásicos de la técnica se pueden representar mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales multivariable, en algunos casos no lineales. La solución de estas ecuaciones muchas veces se ha aplicado a casos simples para los cuales dadas las condiciones de contorno del medio y una geometría simple es posible obtener una ecuación analítica final. La simplicidad de estos problemas no los hace por ello poco interesantes desde el punto de vista de la ingeniería.



Un caso clásico es por ejemplo las soluciones de las ecuaciones de Maxwell para el caso de cables coaxiales, que permite obtener una solución cerrada que modela el funcionamiento de estos sistemas. Sin embargo el desarrollo de los métodos numéricos ha permitido el desarrollar de forma efectiva una tecnología como la de la fibra óptica.

En el caso del campo de la ingeniería mecánica y de estructuras nos encontramos con un conjunto de ecuaciones mucho más difíciles de llevar a la realidad, resultando en la necesidad de generar modelos capaces o bien de aproximar las soluciones a partir de resultados experimentales o bien de usar las ecuaciones generales y expresarlas en una forma que permita resolverlas numéricamente.

Centrándonos en los modelos que permiten usar las ecuaciones generales podemos definir los siguientes:

Método de diferencias finitas: este método se basa en aproximar las derivadas mediante aproximaciones incrementales tales como la de Euler o bien polinomios de Taylor truncados.

Por ejemplo partiendo de la siguiente ecuación diferencial:

$$u'(x) = 3u(x) + 2.$$

El método de Euler para resolverla sería el siguiente:

$$\frac{u(x+h) - u(x)}{h} \approx u'(x)$$

Esto nos da la siguiente ecuación final:

$$u(x+h) = u(x) + h(3u(x) + 2).$$

Esta ecuación es la que nos permite aproximar la función buscada mediante un método iterativo en el cual fijamos los valores de partida en el origen y el incremento entre muestras. El error en este caso vendrá dado por el error numérico y por el error dado por la aproximación de la derivada o el truncamiento en el caso de un polinomio de Taylor.

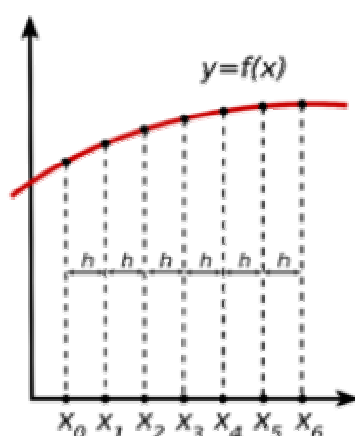


Figura 1.16: Diferencias Finitas.

Método de elementos finitos: El método se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) —sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema— en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados «elementos finitos». El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos». Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama «mallá».

Los cálculos se realizan sobre una mallá o discretización creada a partir del dominio con programas especiales llamados generadores de mallás, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de *sistemas de ecuaciones lineales* (o linealizadas). La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama *matriz de rigidez* del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

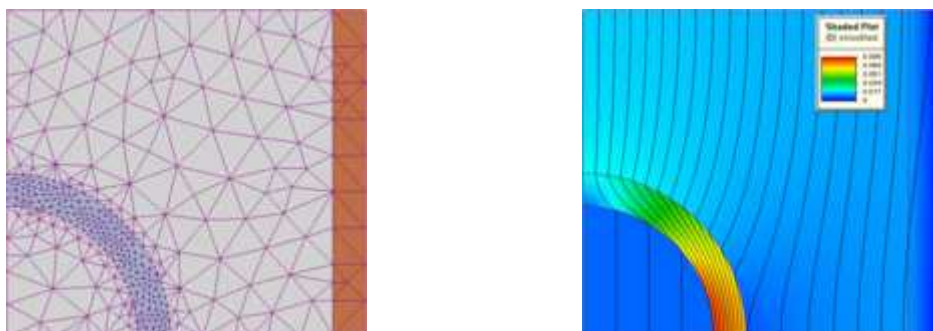


Figura 1.17: Elementos finitos.



Este método es mucho más complejo que el anterior porque no solo discretiza el método y el dominio, sino que hace esto mismo con la solución, buscando una representación de la misma mediante funciones más simples que permiten relacionar entre si los elementos del sistema y cuya combinación lineal de las soluciones permite obtener el resultado buscado.

Cada uno de ellos se plasma en distintas implementaciones comerciales, resultando en un amplio abanico de algoritmos disponibles para cada problema, si bien el método de elementos finitos está mucho más extendido por su capacidad de abordar problemas más complejos.



1.8 Modelos de elementos finitos

Aplicación

En el método de elementos finitos el objeto o sistema bajo estudio se representa mediante un modelo geométrico formado por múltiples regiones discretas interconectadas entre ellas. Un conjunto de ecuaciones de equilibrio, junto con consideraciones físicas tales como compatibilidad y relaciones constitutivas, se aplican a cada elemento del sistema, resultando en un conjunto de ecuaciones de múltiples variables. Este sistema se resuelve utilizando las técnicas clásicas de resolución de problemas del álgebra lineal y no lineal, según sea el problema a resolver.

Una de las ventajas del método es que su precisión viene dada por la malla y número de elementos a analizar. Un refinamiento de la malla permite obtener soluciones más precisas, a costa del tiempo y con el peligro de que una malla excesivamente fina puede incurrir en problemas de precisión numérica.

Uno de los usos más comunes de estos métodos es el cálculo de fatiga y desplazamiento en sistemas mecánicos. Sin embargo el análisis de elementos finitos es capaz de abordar una gran variedad de problemas tales como transferencia de calor, difusión en sistemas de estado sólido, dinámica de fluidos, electromagnetismo,... Los algoritmos permiten abordar problemas más complejos que los que se pueden resolver mediante métodos analíticos, con la posibilidad de analizar problemas que requieran tener en cuenta distintos dominios de la física, tales como por ejemplo el análisis de la variación de la respuesta de un filtro de RF de cavidad que se calienta y se dilata debido a la potencia disipada.

Análisis de elementos finitos

El análisis de elementos finitos en general requiere de tres fases:

Preprocesado: modelar el problema y determinar las condiciones de contorno.

Resolución: resolver el problema planteado mediante el algoritmo deseado.

Postprocesado: una vez obtenidos los resultados es necesario presentarlos para poder analizarlos.

Preprocesado

El primer paso consiste en construir un modelo discreto de la estructura que se vaya a analizar. Los paquetes software actuales permite la importación de modelos 2D y 3D directamente desde los sistemas de CAD/CAM más comunes en la actualidad, eliminando la necesidad de rehacer el modelo.

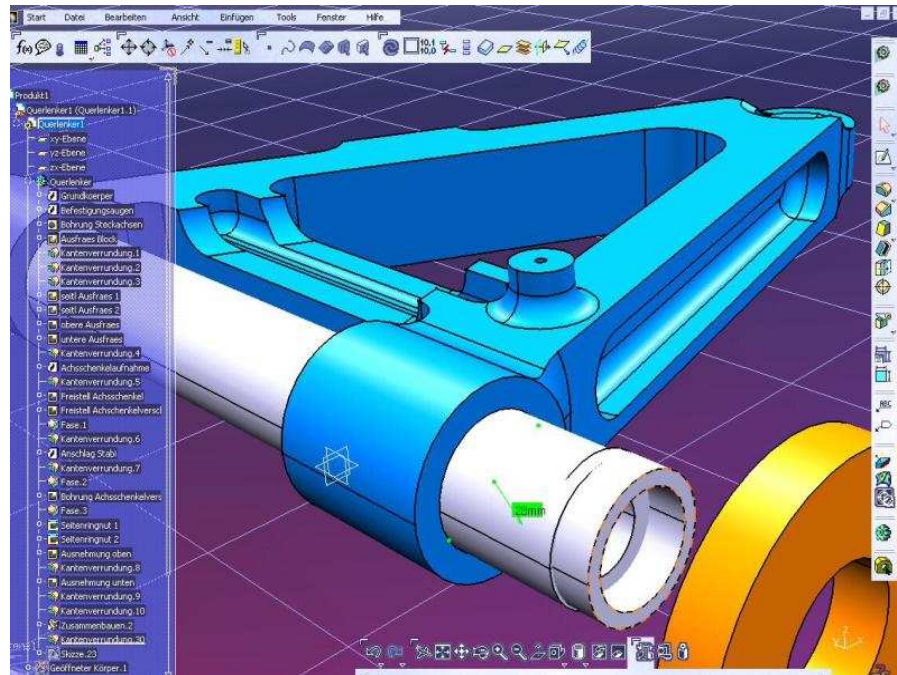


Figura 1.18: Ejemplo modelo 3D.

Este modelo debe representar lo más fielmente posible el modelo real que queramos estudiar, o que al menos presente aquellos detalles que sean más importantes para el análisis.

El siguiente paso consiste en generar una malla que definirá las zonas del modelo sobre las que se ejecutará el algoritmo. Este paso se realiza con una herramienta especializada en la generación de mallas en función del tipo de problema que se quiera resolver y de la precisión solicitada.

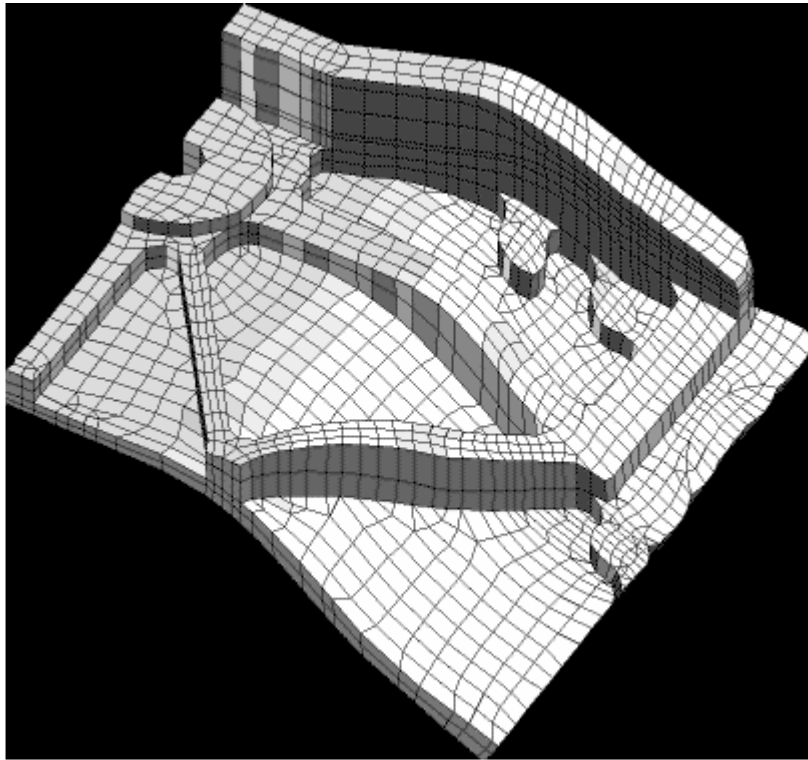


Figura 1.19: Mallado.

Los nodos de la malla serán los puntos en los que se calcularán los resultados, tales como calor, desplazamiento, carga,... Estos nodos están identificados de manera que posteriormente podremos observar las soluciones obtenidas en estos puntos.

Análisis, cálculo de la solución

El siguiente paso consiste en dada la malla, las condiciones de contorno y el algoritmo deseado, éste se ejecuta y se espera hasta que se alcance alguna de las condiciones de convergencia establecidas.

Este paso puede resultar bien en una convergencia de la solución o bien en una divergencia, ante lo cual habrá que modificar la malla para obtener una condición de trabajo que permita al algoritmo converger.

En caso de no obtener convergencia entonces es posible que el problema planteado sea en si inestable, con lo que este método no será el más adecuado para resolverlo.

Post procesado (visualización)

Una vez obtenidos los resultados es necesario disponer de un conjunto de herramientas utilizadas para representar los datos obtenidos, tales como desplazamientos, calor, estrés,...

Este tipo de resultados normalmente se pueden o bien representar mediante gráficos 1D, 2D o 3D, o mediante un diagrama de colores representado directamente sobre la estructura a analizar, permitiendo la localización de zonas en las que existan problemas potenciales.

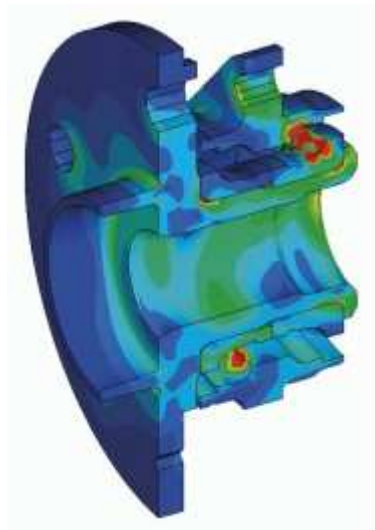


Figura 1.20: Postprocesado.

Aplicaciones del método de elementos finitos a la industria mecánica

En la actualidad el análisis de elementos finitos es una de las herramientas fundamentales dentro de las industrias mecánica, aeronáutica, biomecánica y automovilística. Estas industrias utilizan ya de manera rutinaria simuladores capaces de modelar aspectos relacionados con el análisis térmico, electromagnético, dinámica de fluidos, cálculo de estructuras, con la posibilidad de realizar análisis en múltiples dominios.

La mejora de los sistemas ha permitido el desarrollar y probar de manera virtual sistemas muy complejos y caros de prototipar, permitiendo realizar ajustes al modelo antes incluso de haberlo fabricado, reduciendo los costes de diseño y el tiempo de llegada de los productos al mercado.

Nuevas tendencias en la industria

Modelado dinámico

Tradicionalmente los sistemas de cálculo permitían el análisis de piezas bajo condiciones estáticas o bien de cambio lento. Sin embargo industrias tales como la del automóvil demandan herramientas que permitan hacer un análisis dinámico de modelos bajo condiciones de cambio rápido. Es el caso del análisis de deformaciones frente a impactos.

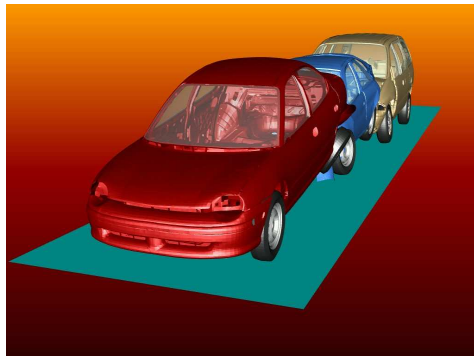


Figura 1.21: Modelado dinámico.

Modelado de ensamblajes

Además del análisis dinámico, es necesario poder modelar conjuntos de piezas de distintos materiales que a su vez posean interrelaciones entre ellas, bien sea mediante conectores, soldaduras, guías de desplazamiento,... El algoritmo no solo debe tener en cuenta la naturaleza de las piezas sino la interrelación que exista entre ellas. Un caso típico es el análisis de componentes de camiones que sufren un fuerte desgaste por uso y vibración.



Figura 1.22: Modelado de ensamblajes.



2. Creación del modelo

2.1. Condiciones iniciales

En un primer momento tenemos que definir el problema general.

En el problema a definir se considera la hipótesis de *deformación plana*. Esto requiere que no hay flujo de material fuera de la dirección plana y que el flujo en cada plano paralelo a la sección simulada es idéntico. Por tanto tenemos en todas las secciones el mismo estado tensional.

Tenemos que elegir el sistema de *unidades* para los resultados. Elegiremos en nuestro caso el Sistema Internacional (SI). Por tanto tenemos:

Entity	SI unit
Time	second
Length	mm
Area	mm ²
Volume	mm ³
Force	N
Mechanical Energy	N-mm
Stress	MPa
Heat Energy	N-mm
Temperature	C
Conductivity	N/sec/C
Heat Flux Rate	N/mm/sec
Heat Capacity	N/mm ² /C
Convection Coefficient	N/sec/mm/C
Lubricant HeatTransfer Coefficient	N/sec/mm/C

Tabla 2.1: Sistema de Unidades DEFORM 2D.



2.2. Geometrías

Para la realización de la simulación se debe analizar la geometría que se va a usar. La placa a plegar será definida mediante 4 puntos que nos acotarán el ancho y el espesor.

Tomaremos una placa estándar que tendrá un espesor de 4mm y un ancho de 50mm. Este espesor es elegido como estándar debido a que es muy usado en la industria. La elección del ancho está relacionada con la abertura de la matriz. La abertura está relacionada de forma lineal con el espesor. Hay varias relaciones lineales:

$$V = 6 \cdot e$$

$$V = 8 \cdot e$$

$$V = 10 \cdot e$$

$$V = 12 \cdot e \quad \text{siendo } e \text{ el valor del espesor [mm]}$$

Se tomará para la realización de este proyecto la abertura correspondiente a 8 veces el espesor ya que es ampliamente utilizada en la industria. Por tanto, obtendremos una abertura de valor de 32 mm. La matriz se simulará como dos apoyos circulares, por tanto la longitud de la matriz se representará como la distancia mínima entre los puntos de la circunferencia. Con esto llegamos a la conclusión de que hay que poner una mayor longitud al ancho de la chapa que la abertura, y por ello se ha elegido poner un ancho de 50mm. Los ensayos experimentales se hicieron con anchos de 50mm y de 100mm.

El Tipo de Objeto elegido para la chapa será *elastoplástico* para que tenga en cuenta la parte elástica del material y por tanto la **recuperación** del mismo. En problemas donde la recuperación del material no fuera objeto de estudio, no sería necesaria la elección de Tipo de Objeto elastoplástico y bastaría con la elección de Tipo de Objeto *Plástico*. Las diferencias que encontraríamos en este cambio de elección serían, un menor tiempo de cálculo por parte del programa de elementos finitos DEFORM2D y gráficamente este hecho se reflejaría en la simulación de forma que a la subida del macho la placa no se recupera en absoluto.

La recuperación de los inoxidables es función del *módulo de elasticidad*, del *ángulo* y del *radio de plegado*. Para los ángulos típicos de 90°, los inoxidables del tipo AISI 304 recocidos recuperan de 2 a 4° para los radios comprendidos entre el espesor y 6 veces el espesor.

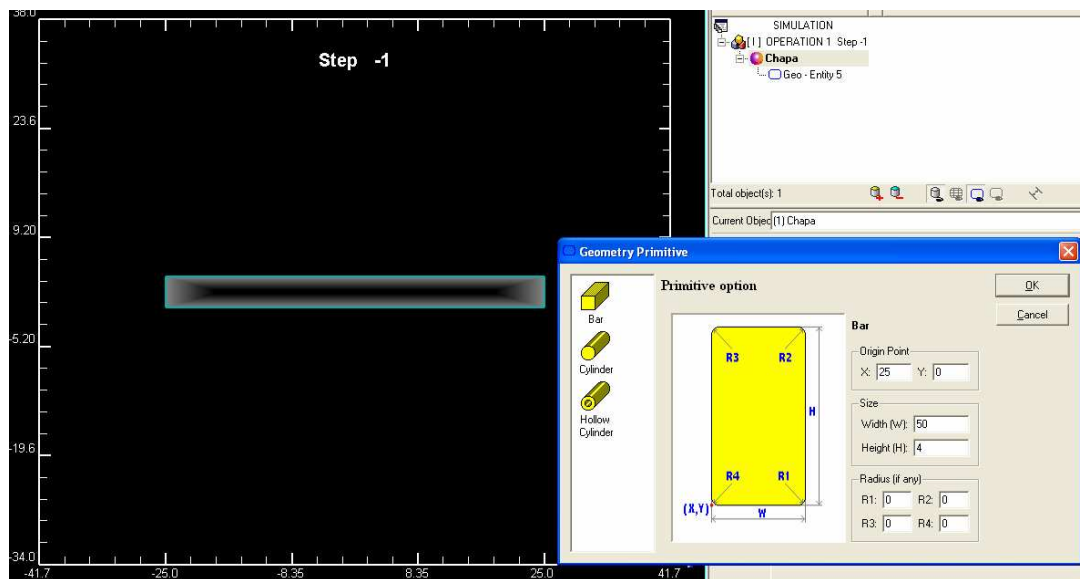


Figura 2.1: Geometría chapa estándar.

La matriz en V será simulada mediante unos apoyos cilíndricos de radio 3mm y colocados a una distancia entre ellos igual a la abertura de la matriz. Esta distancia no se mide desde el centro de los cilindros sino que se toma la distancia mínima entre los puntos de la circunferencia que están alineados en horizontal con los centros de los cilindros. En este caso se escoge, como ya se ha explicado anteriormente una abertura estándar de 8 veces el espesor ($V = 8 \cdot e = 32\text{mm}$).

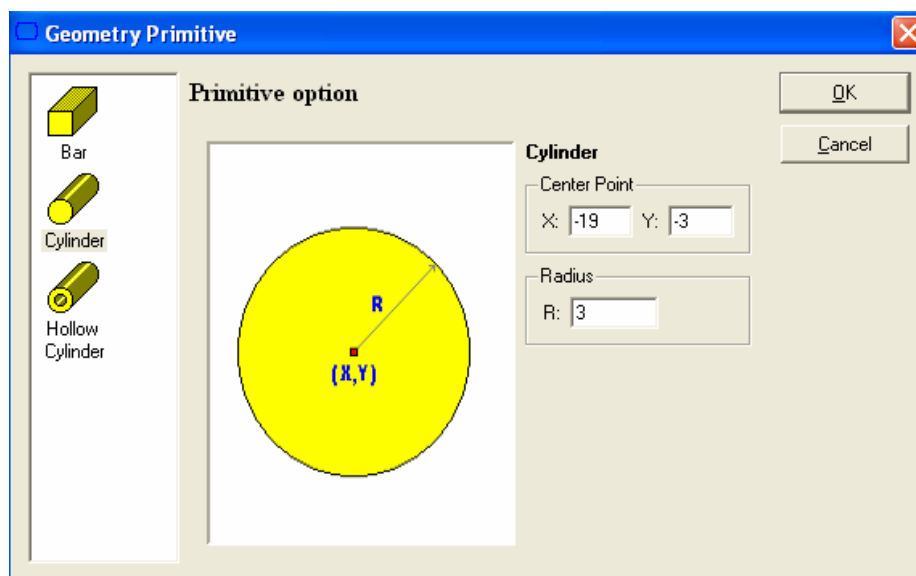


Figura 2.2: Geometría apoyos estándar.

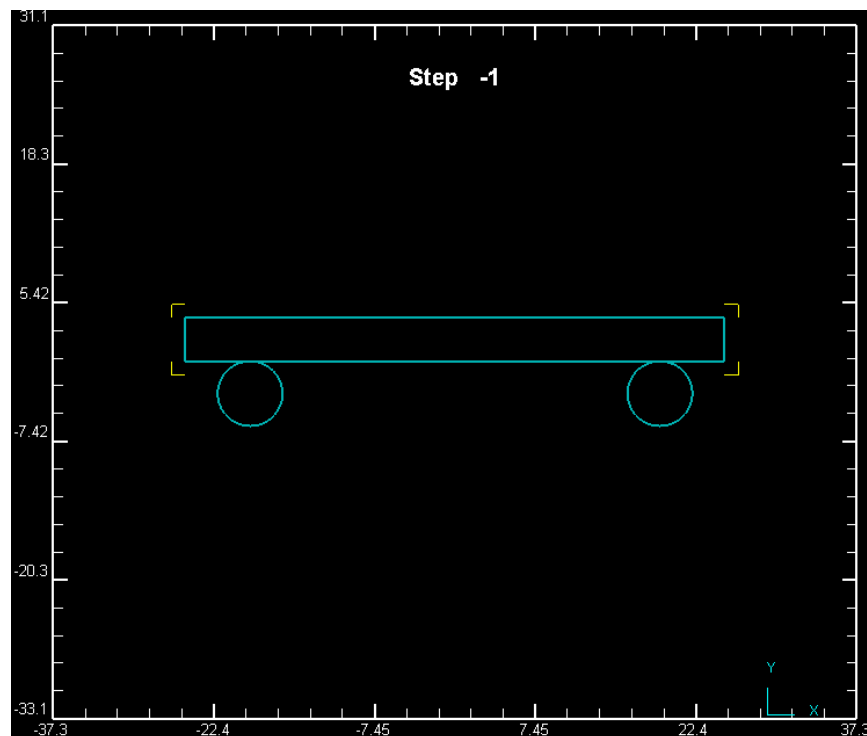


Figura 2.3: Conjunto chapa-apoyos estándar.

El macho o punzón será de Tipo Rígido para que pueda deformar la chapa y estará definido como una barra vertical con un radio de punta determinado. El radio de punta elegido es de 1,5mm. Se ha elegido este radio por ser un radio ampliamente usado además de por su versatilidad. Al ser un radio de punta pequeño, se pueden plegar hasta ángulos más agudos que si fuera un radio de punta más grande.

Se tiene que cumplir que el radio de punta del punzón sea menor que el radio de curvatura interior de la chapa. Porque así influye lo menos posible el radio del punzón.

Si el radio del punzón es mayor que el radio de curvatura de la chapa, aparece el fenómeno conocido como *gap*. Este fenómeno consiste en la aparición entre la chapa y el punzón de una zona sin contacto entre ambos. Esto distorsiona los valores de fuerza teóricos ya que modifica el punto de aplicación de la Fuerza de plegado. En el estudio de este proyecto tenemos que el radio del punzón es inferior a la curvatura de la chapa.

Para conseguir un ángulo final de plegado de 90° y teniendo en cuenta la recuperación del material, habrá que plegar hasta aproximadamente 87°. Por tanto es buena la elección del macho de radio de punta 1,5mm.

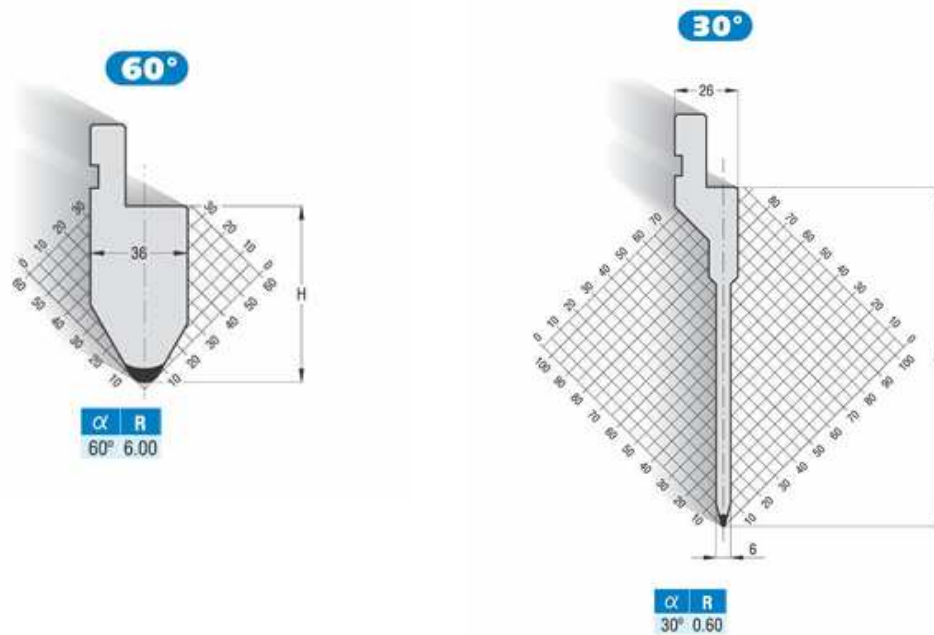


Figura 2.4: Distintos radios de punta (Fuente: Mecos Ibérica SL).

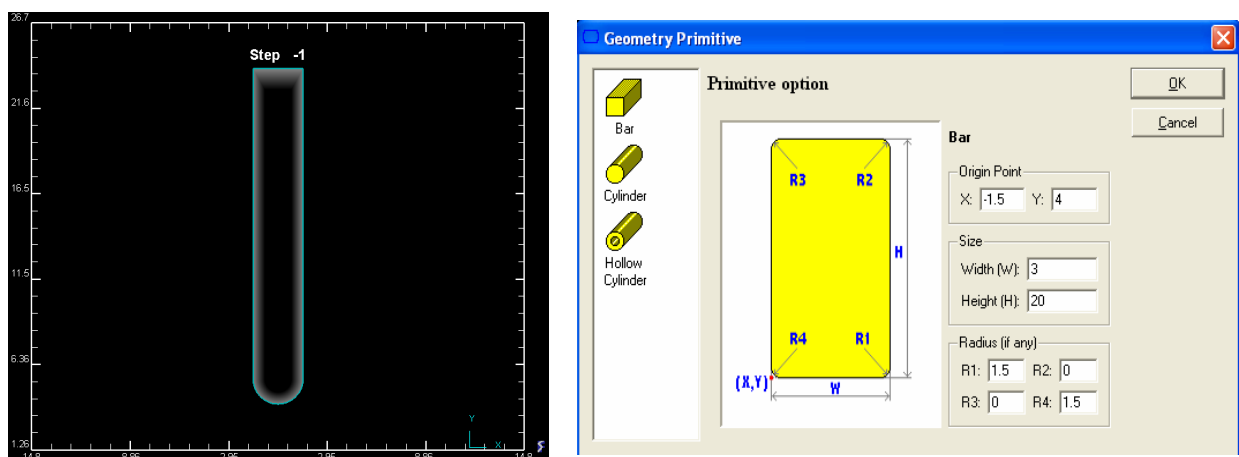


Figura 2.5: Macho con radio de punta de 1,5mm.

El macho se ha definido como un rectángulo en posición vertical con un radio en uno de sus extremos de 1,5mm. Disponemos el macho de forma simétrica respecto de la chapa a plegar. En este caso es irrelevante la geometría del macho por encima del radio de punta, siempre y cuando no interfiera en el plegado. Para la realización de plegados sucesivos en una misma pieza se realiza una geometría especial del macho para que en cada plegado no se produzca choque entre pieza y punzón y se pueda deformar la pieza.

Los plegados sucesivos se realizan en la misma plegadora y se va cambiando la disposición del material a plegar, adoptando distintas posiciones.

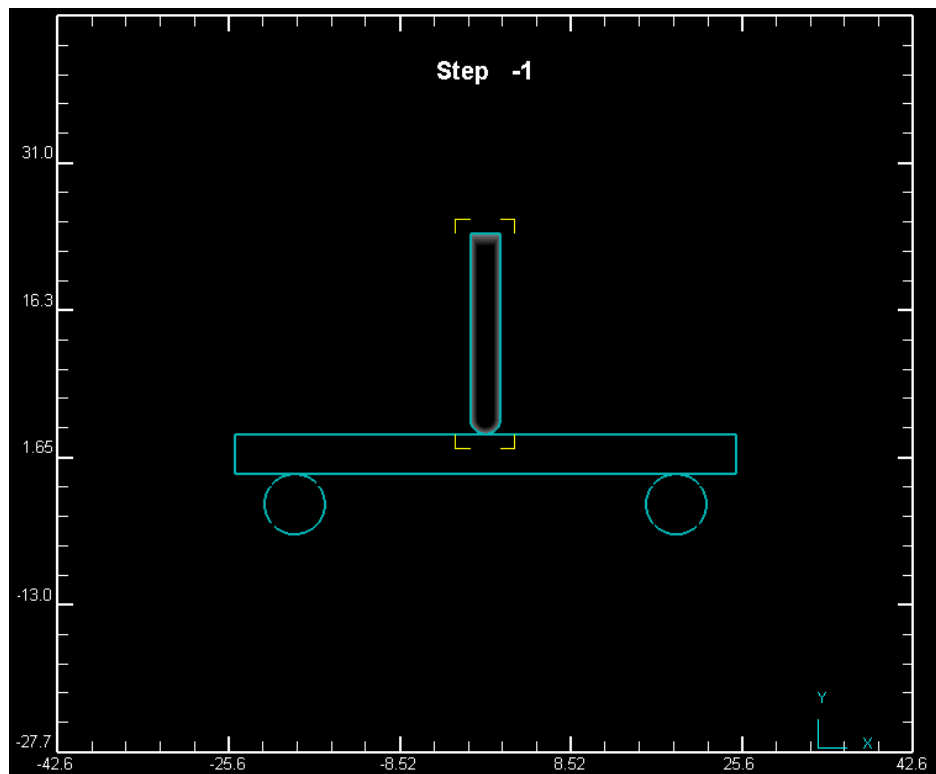


Figura 2.6: Geometría conjunto estándar.



2.3. Mallado: descripción y criterios

El mallado es la división en unidades más pequeñas del elemento objeto de estudio, esta división es la base de los programas de elementos finitos. En nuestro caso el mallado sólo se realiza en la chapa. El mallado no se realiza en los apoyos ni en el macho ó punzón ya que son elementos de tipo Rígido y por tanto el programa de elementos finitos los considera como indeformables.

El mallado dentro de un problema de elementos finitos puede ser de varias formas ya que se puede hacer de densidad uniforme o no uniforme. Una malla de densidad uniforme significa que todos los elementos que dividen el objeto estudio tienen las mismas dimensiones mientras que una malla de densidad no uniforme significa que hay una relación entre los elementos.

En nuestro problema estándar tenemos varias zonas críticas donde será importante poner un mallado más afinado. Estas zonas críticas son la zona central de la chapa, afectada por la bajada del macho y las zonas en contacto con los apoyos que simulan a la matriz, ya que en esta zona se produce deslizamiento.

Por tanto, se realizarán dos zonas con distinta densidad de malla. En las zonas más críticas habrá una mayor densidad de malla mientras que en el resto de la chapa la densidad de malla será menor. Las zonas de importancia tendrán un Relative Element Size (tamaño relativo entre elementos) de 0,1 y el resto de la chapa un Relative Element Size de 5.

Tomaremos 1000 como número total de elementos estándar que formen la malla para nuestra chapa de espesor 4mm y ancho 50mm. Tanto la zona central como la zona correspondiente a los apoyos deben de ser simétricos con respecto al eje Y que divide la chapa en dos mitades iguales, para que nos dé un mejor resultado de análisis en las gráficas, ya que situamos el macho de forma simétrica.

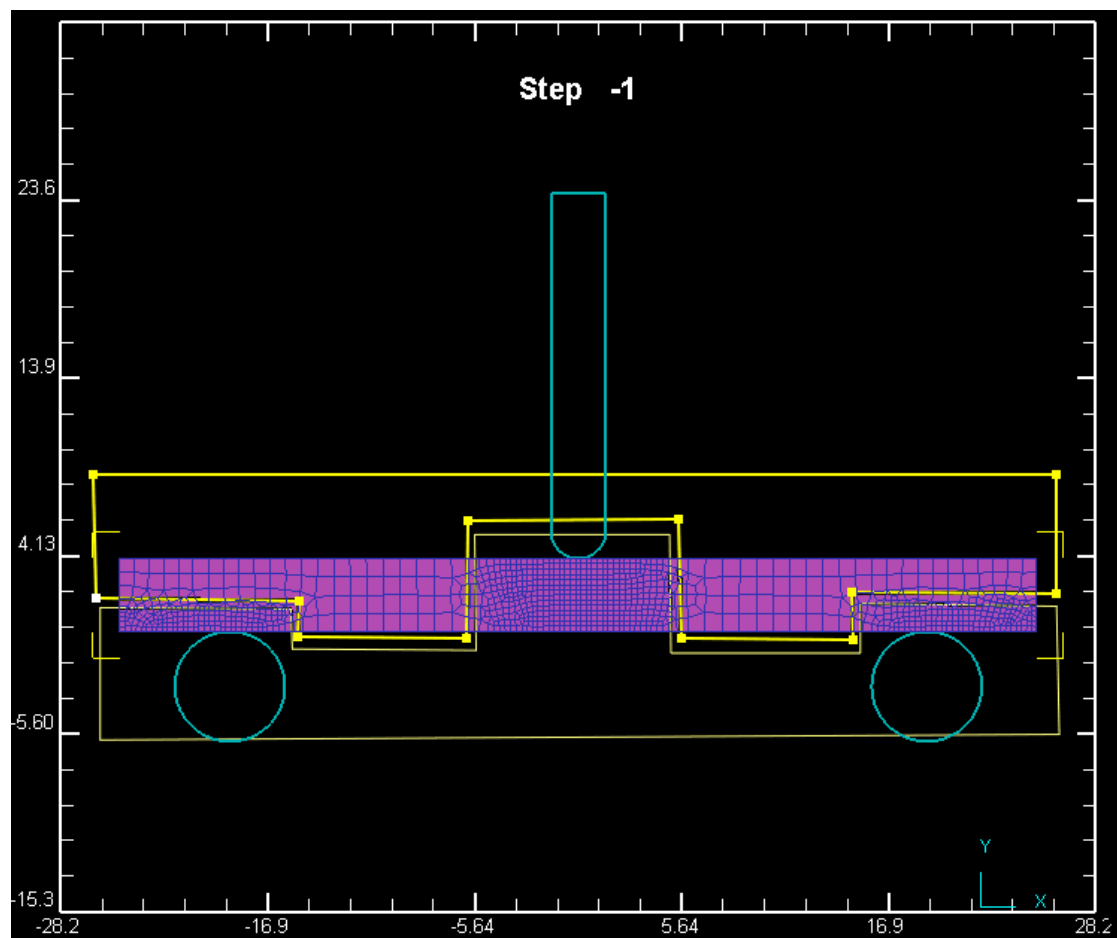


Figura 2.7: Mallado en chapa.

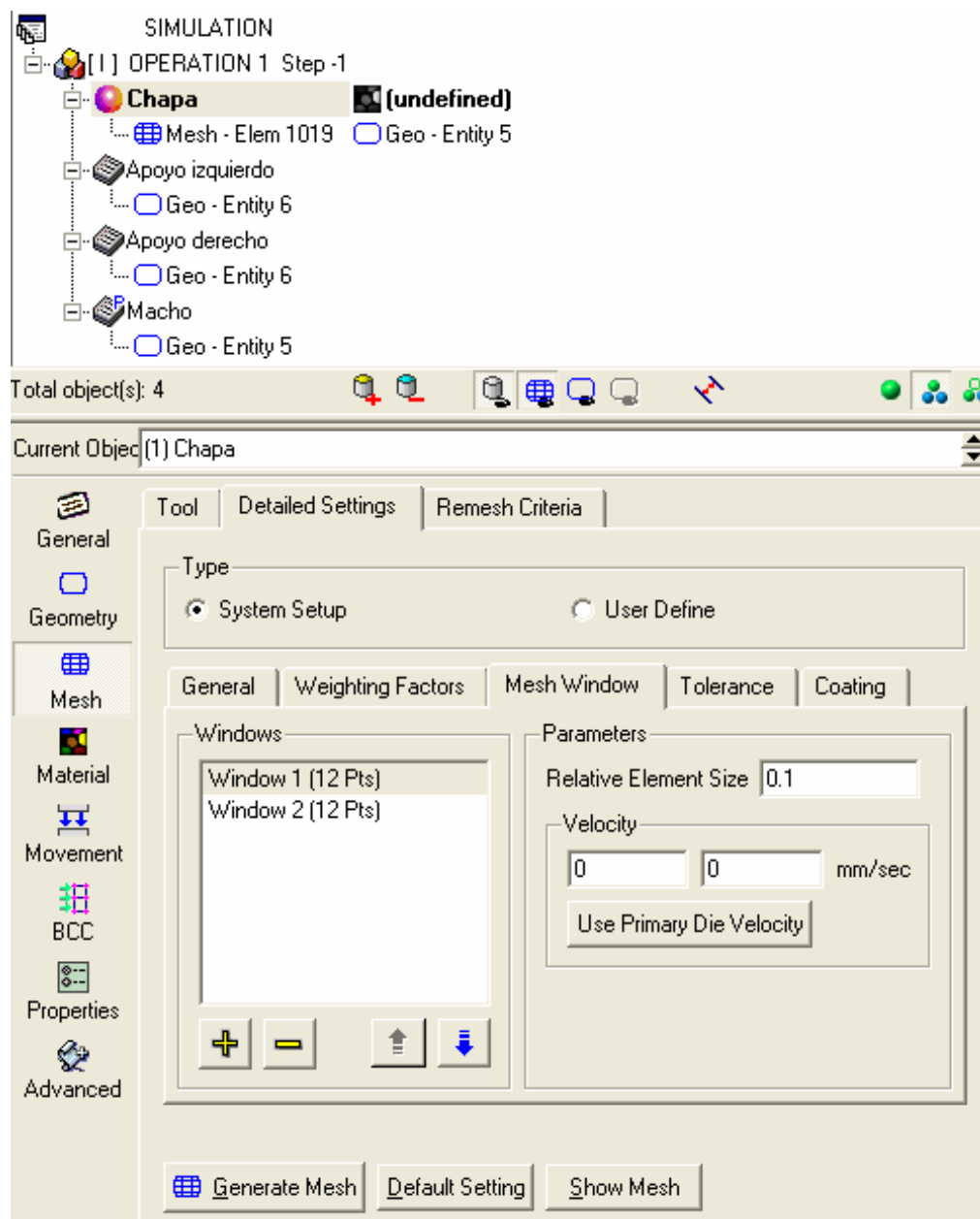


Figura 2.8: Condiciones densidad de malla en chapa.



2.4. Material

El material será definido solamente en la chapa ya que carece de sentido aplicar material en los apoyos y en el macho debido a que son elementos rígidos y por tanto indeformables.

Para la creación del modelo estándar se tomará como material, el material de la biblioteca del programa de elementos finitos DEFORM 2D, el Acero Inoxidable Austenítico AISI304 con un Módulo de Elasticidad o Módulo de Young $E = 200\text{GPa}$.

2.5. Condiciones de contorno (Movimientos y Fijaciones)

La **matriz** es un elemento Rígido y estará fijo así que su condición de contorno será que tenga movimiento nulo tanto en el eje X como en el eje Y.

El **macho** tendrá un movimiento vertical hacia abajo (-Y) para que pueda deformar a la chapa.

En las plegadoras hay dos velocidades distintas, la velocidad de aproximación y la velocidad de acción. La primera normalmente tiene un valor de 9mm/s mientras que la segunda es de 7mm/s. La velocidad de aproximación la realiza la plegadora hasta una distancia cercana al objeto a plegar. En nuestro problema la velocidad asignada al macho será de 7mm/s constante, ya que consideramos que el macho está en el momento del contacto con la chapa.

La **chapa** es un elemento Elastoplástico y su movimiento estará subordinado por el movimiento del macho y por el movimiento nulo de los apoyos. Por tanto no hay que poner ninguna condición cinética a este elemento.

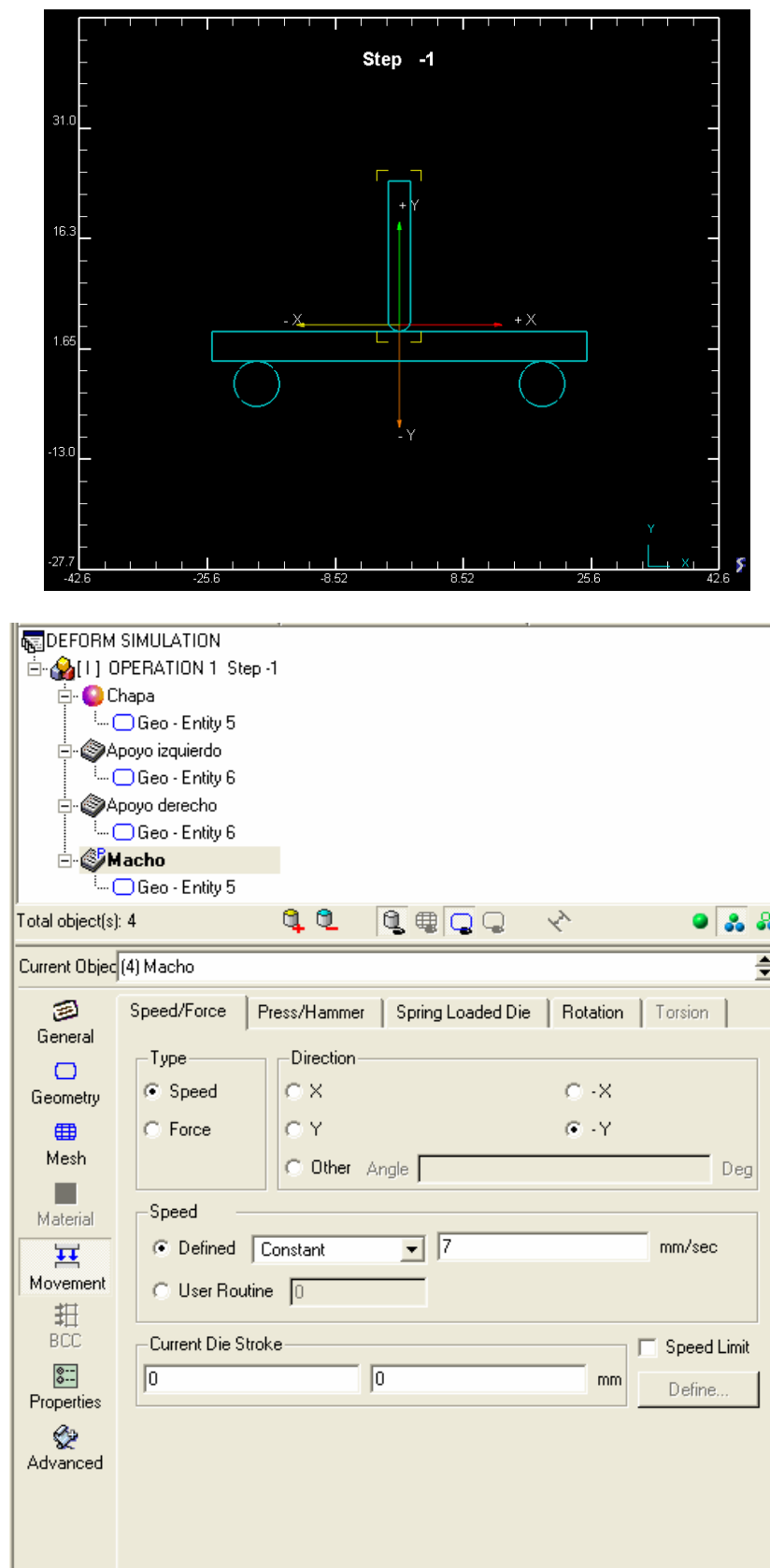


Figura 2.9: Condición de movimiento en el macho.



2.6. Otras condiciones

En el problema objeto de estudio se tiene que definir el paso y su número. El problema constará de un número determinado de pasos en los que se cumple una determinada condición de tiempo o de espacio. En nuestro caso cada paso estará definido por el tiempo, es decir, cada paso transcurrirá en el mismo espacio de tiempo.

DESCENSO DEL MACHO

Un número de 300 pasos será adecuado para la resolución de la bajada del macho. Con un menor número de pasos se puede obtener una solución menos precisa y con un número mucho mayor se incrementa de forma elevada el tiempo de resolución por parte del programa de elementos finitos.

DEFORM 2D tiene la opción de salvar los cálculos de determinado número de pasos (Step Increment to Save). Tomaremos un valor de 10, por tanto cada 10 pasos el programa guardará todos los resultados obtenidos en ese décimo puesto. Las gráficas tendrán todos los valores calculados pero sólo obtendremos los resultados numéricos cada diez pasos.

Para la obtención del tiempo que durará cada paso se procede como sigue:

- Inicialmente consideraremos que el macho bajará 0,9 veces el valor de la mitad de la abertura de la matriz en sentido $-Y$.

$$A = 8 \cdot e = 32mm$$

$$Y = 0,9 \cdot \left(\frac{32}{2} \right) = 14,4mm$$

Este valor le tomamos como referencia porque luego usaremos el paso o step donde tengamos un valor aproximado de 87° . A partir de este step se procederá a la subida del macho para el estudio de la recuperación.

La velocidad de bajada del macho será de $v = 7mm/seg$, por tanto el tiempo empleado en la bajada del macho será de:

$$t = \frac{Y}{v} = \frac{14,4}{7} = 2,057seg$$

Este sería el tiempo total empleado, por tanto el valor del tiempo empleado en cada paso o step sería:

$$\text{SolutionStepsDefinitionWithEqualTimeIncrement} = \frac{t}{n^{\circ} \text{ pasos}} = \frac{2,057}{300} = 0,0067 \text{ seg} / \text{paso}$$

Por tanto el macho recorrerá la distancia de 14.4mm en 300 pasos empleando en cada paso un tiempo de 0,0067seg/paso, haciendo un total de 2,057seg a una velocidad de 7mm/seg.

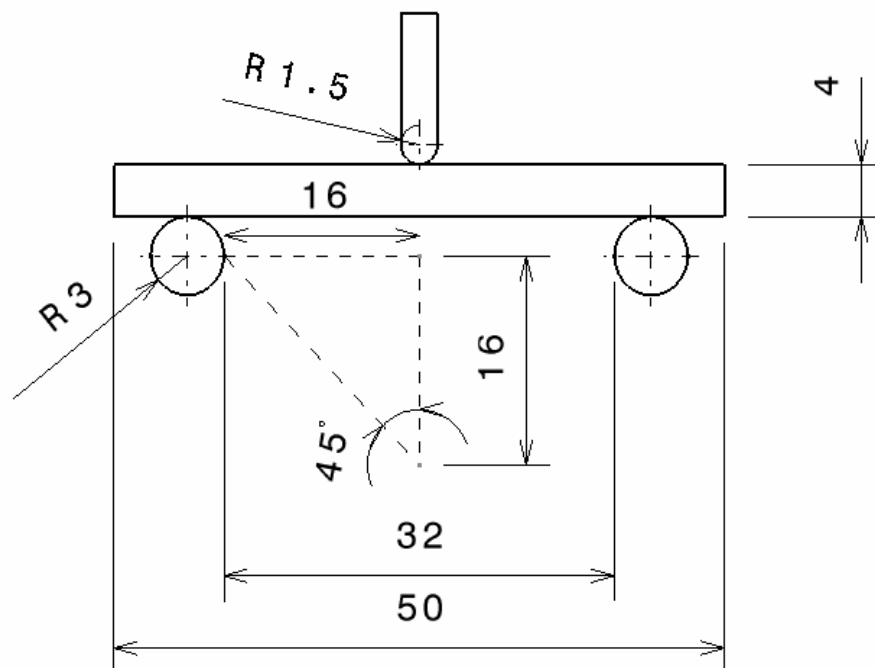


Figura 2.10: Análisis geometría.

ASCENSO DEL MACHO

La subida del macho se realiza en el paso más cercano en el cual la chapa forme aproximadamente 87°, para llegar a tener 90° en el estado final después de la recuperación.

Para la subida no se necesitan muchos pasos ya que el recorrido que debe hacer el macho es muy pequeño. Bastaría con que macho y chapa dejaran de estar en contacto.



Se realizarán 40 pasos guardados de 5 en 5. Como el espacio recorrido en cada paso es menor escogemos que se guarden los resultados con una mayor frecuencia.

Velocidad de subida del macho $v = 7 \text{ mm/seg}$.

Espacio recorrido $s = 4,375 \text{ mm}$.

Tenemos por tanto que el tiempo empleado es:

$$t = \frac{s}{v} = \frac{4,375}{7} = 0,625 \text{ seg}$$

Una vez calculado el tiempo total empleado en la subida, calculamos el valor del tiempo empleado en cada paso:

$$\text{SolutionStepsDefinitionWithEqualTimeIncrement} = \frac{t}{n^{\circ} \text{ pasos}} = \frac{0,625}{40} = 0,015625 \text{ seg} / \text{paso}$$

2.7. Elementos de contacto

En este punto se tienen que explicar los conceptos que influyen al tener varios elementos en contacto. Principalmente hay dos puntos a tener en cuenta, la *fricción* que aparece siempre que hay elementos en conexión, y el valor de *tolerancia* que se define debido a que la resolución del estudio se hace con un programa de elementos finitos.

El propósito de las relaciones entre los objetos es definir cómo los diferentes elementos interactúan unos con otros. Todos los objetos que vayan a estar en contacto mutuo a lo largo de la simulación deben tener definido la relación de contacto.

Tenemos varios elementos que permanecen en contacto. Algunos de forma permanente y otros de forma temporal.

De forma permanente tenemos la relación entre la chapa y los apoyos que simulan a la matriz, esto ocurre tanto a la bajada como a la subida del macho, y de forma temporal está la relación entre la chapa y el macho, que dejan de estar en contacto en la subida del mismo.

El coeficiente de fricción especifica la fricción que existe en la zona de contacto entre los elementos.

Se usará la **fricción** de Coulomb. Este tipo de fricción se usa cuando existe contacto entre dos objetos deformables elásticamente (se incluye también el caso de elementos elastoplásticos, ya que se pueden deformar elásticamente), o entre un objeto elástico y otro/s rígido/s. Generalmente se usa para procesos de conformado de chapas.

La fuerza de fricción del modelo de la ley de Coulomb se define como sigue:

$$f_s = \mu \cdot p$$

donde f_s es la tensión de fricción, p es la presión en la zona entre los dos cuerpos, μ es el factor de fricción. Esta fuerza está presente siempre que halla fuerza de fricción o presión entre los objetos.

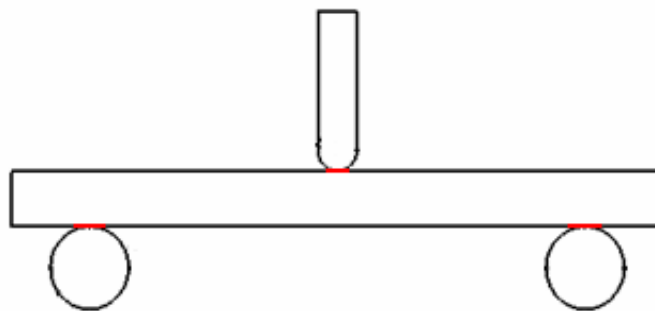


Figura 2.11: Zonas de contacto entre elementos.

Se tomará un valor de fricción de 0,2 como valor estándar. Este valor se aplica a las relaciones:

- Macho-chapa
- Apoyo izquierdo-chapa
- Apoyo derecho-chapa

Como se ha comentado anteriormente, se tiene que explicar el sentido del valor de **tolerancia**. Este valor está relacionado con las condiciones de contorno entre objetos, en las que se identifica los nodos del objeto “esclavo (slave)” que están en contacto con la superficie del objeto “rígido (master)”.

El programa DEFORM 2D actualiza automáticamente las condiciones de contacto, pero hay que definir las condiciones de contacto *iniciales* para el primer paso o step de la solución. Cuando las condiciones de contorno entre los objetos son generadas, el programa chequea una zona o banda de tolerancia (definida por una distancia) alrededor de la superficie o superficies del objeto rígido o master. Cualquier nodo o nodos que se encuentren dentro de esta zona de tolerancia, se consideran que están en contacto con la superficie. Y su posición se ajusta, si es necesario, para que estén dentro de la superficie del macho.

Se tiene que poner un valor razonable, ya que si se pone una banda de tolerancia demasiado grande, habrá demasiados nodos en contacto con la superficie del macho, lo que puede derivar en una distorsión del mallado del objeto de estudio. Sin embargo, si el valor es demasiado pequeño puede suceder que no haya ningún nodo dentro de la banda de tolerancia y no se genere ninguna condición de contacto. Tomaremos como valor estándar para la banda de tolerancia, la distancia de 0,01mm

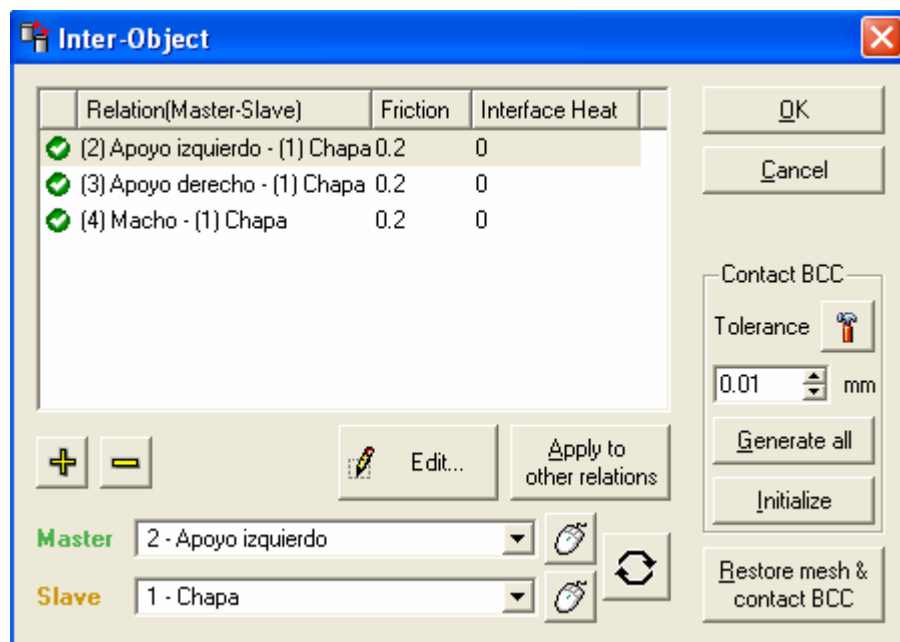


Figura 2.12: Condiciones de contacto. Valor de fricción y tolerancia.

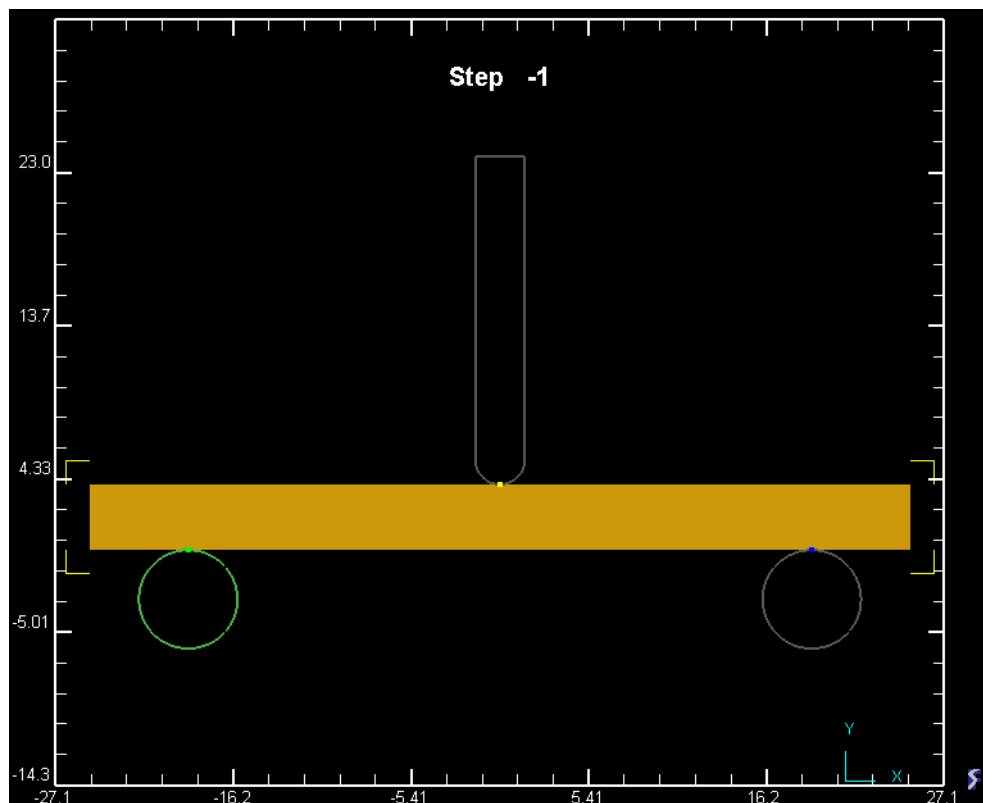


Figura 2.13: Nodos dentro de la banda de tolerancia.

Se ha tomado este valor de tolerancia ya que es uno de los valores mínimos encontrados. Un valor por debajo de éste hace que dentro de la banda de tolerancia no entrara ningún nodo y por tanto no se podía generar una condición de contacto

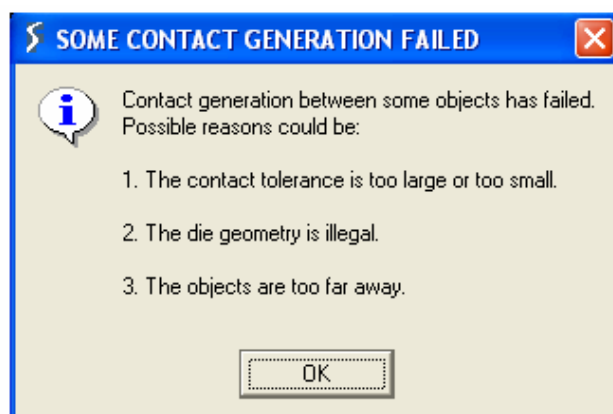


Figura 2.14: Fallo en la generación de condiciones de contacto.



2.8. Simulación

Una vez definidos todos los parámetros del problema objeto de estudio se procede a su almacenamiento.

La información de los parámetros o input data queda guardada en el pre-procesador del programa DEFORM 2D.

Todos los parámetros se guardan en un archivo con la extensión “.keyword”. Por tanto este archivo contiene los datos de definición de un problema específico.

Una vez generado el archivo *.keyword* se procede a la generación del archivo *database*. El archivo *database* contiene todos los datos de la simulación completa. Es decir, contiene los datos de entrada (especificados en el archivo *.keyword*) y los datos que se han salvado en cada paso según el parámetro “Step increment to save” que hallamos escogido. Como ya se explicó anteriormente con este parámetro eliges cada cuántos pasos quieres que se guarde la información.

Una vez generada la *database* se procede a la simulación del problema. El programa de elementos finitos realiza los cálculos numéricos para la resolución del problema.

DEFORM 2D tiene varios archivos que durante la simulación nos dan información sobre la misma. Como por ejemplo, mensajes de remallado, hora de comienzo y de finalización de la simulación, mensajes de error debido a un paro de la simulación inesperado o también información sobre el comportamiento de la simulación.

Presentamos unas figuras con la información que nos detalla el programa de elementos finitos DEFORM 2D durante y después de la simulación. Esta información es adicional a la que se puede analizar en el post-procesador del programa.

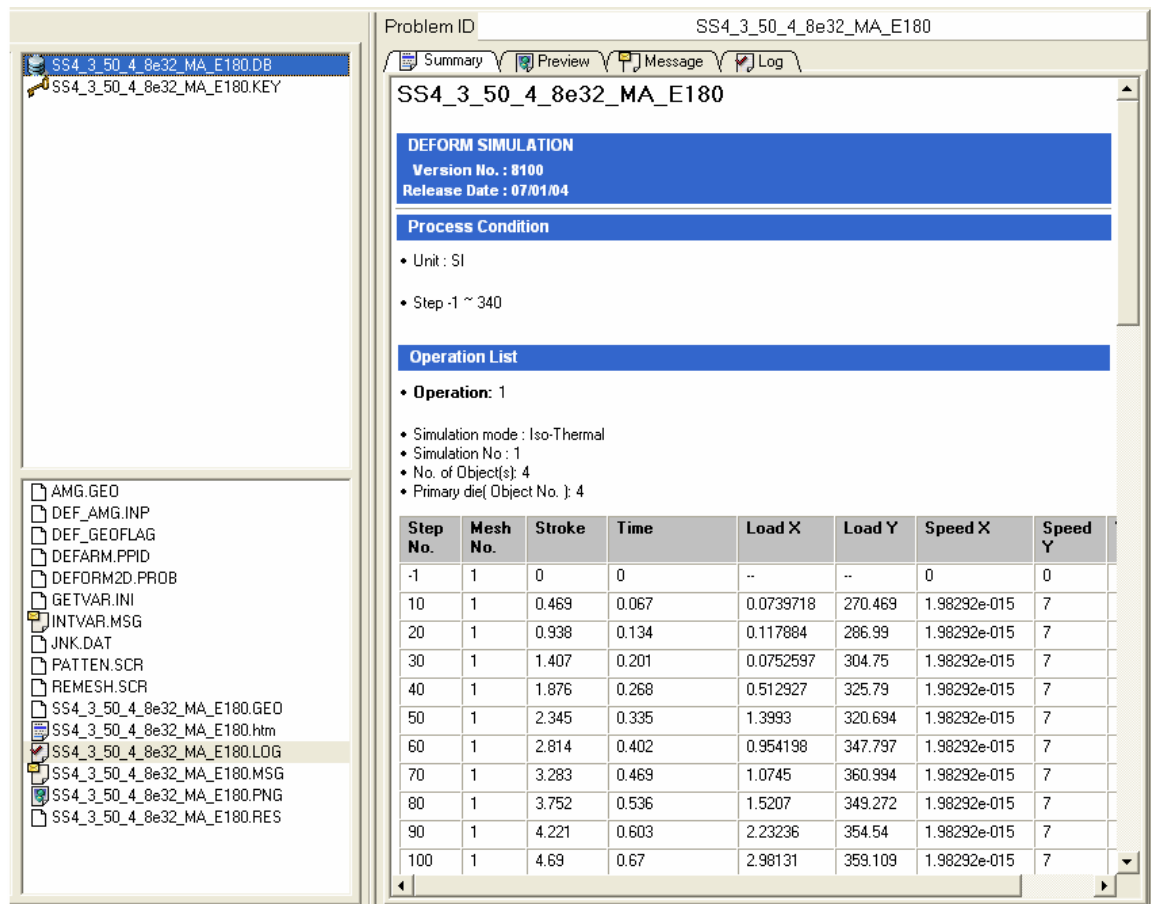


Figura 2.15: Información guardada en cada paso o step.

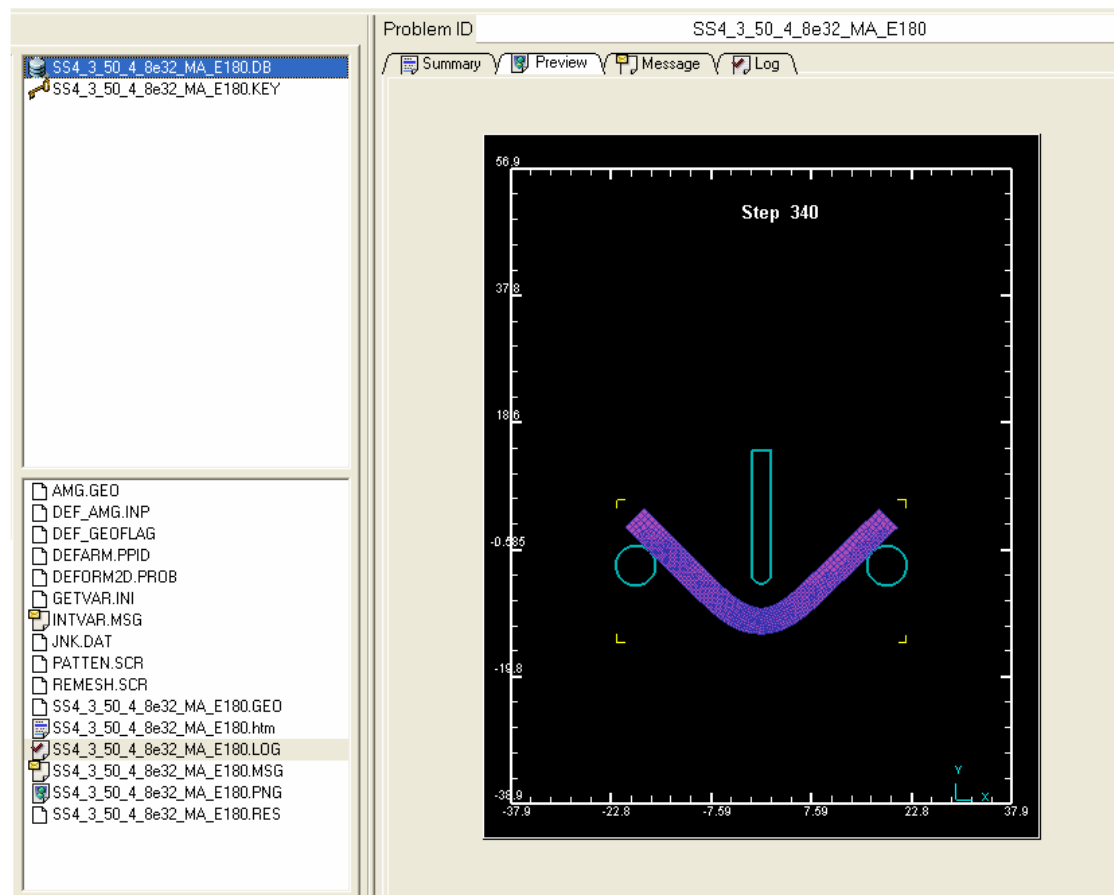


Figura 2.16: Vista del último paso o step.

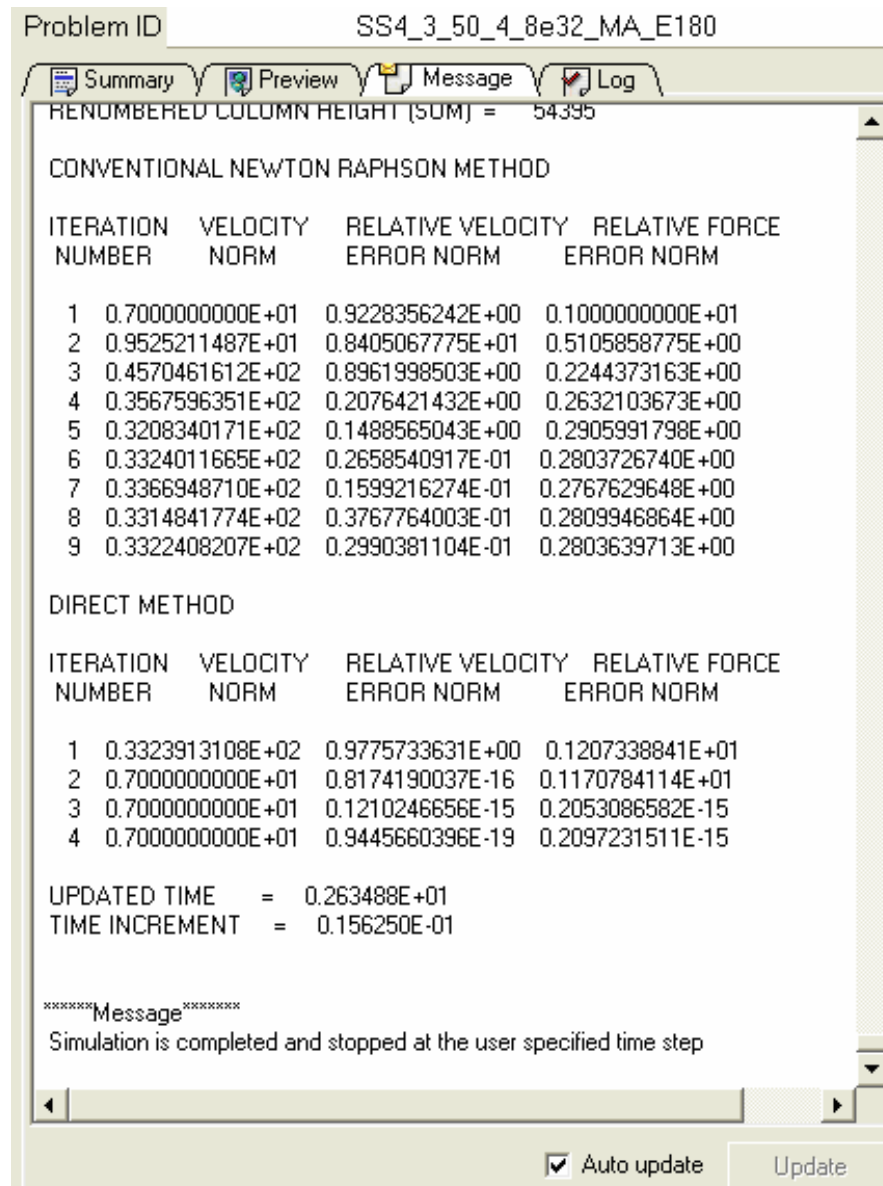


Figura 2.17: Información de cada step obtenida durante la simulación.

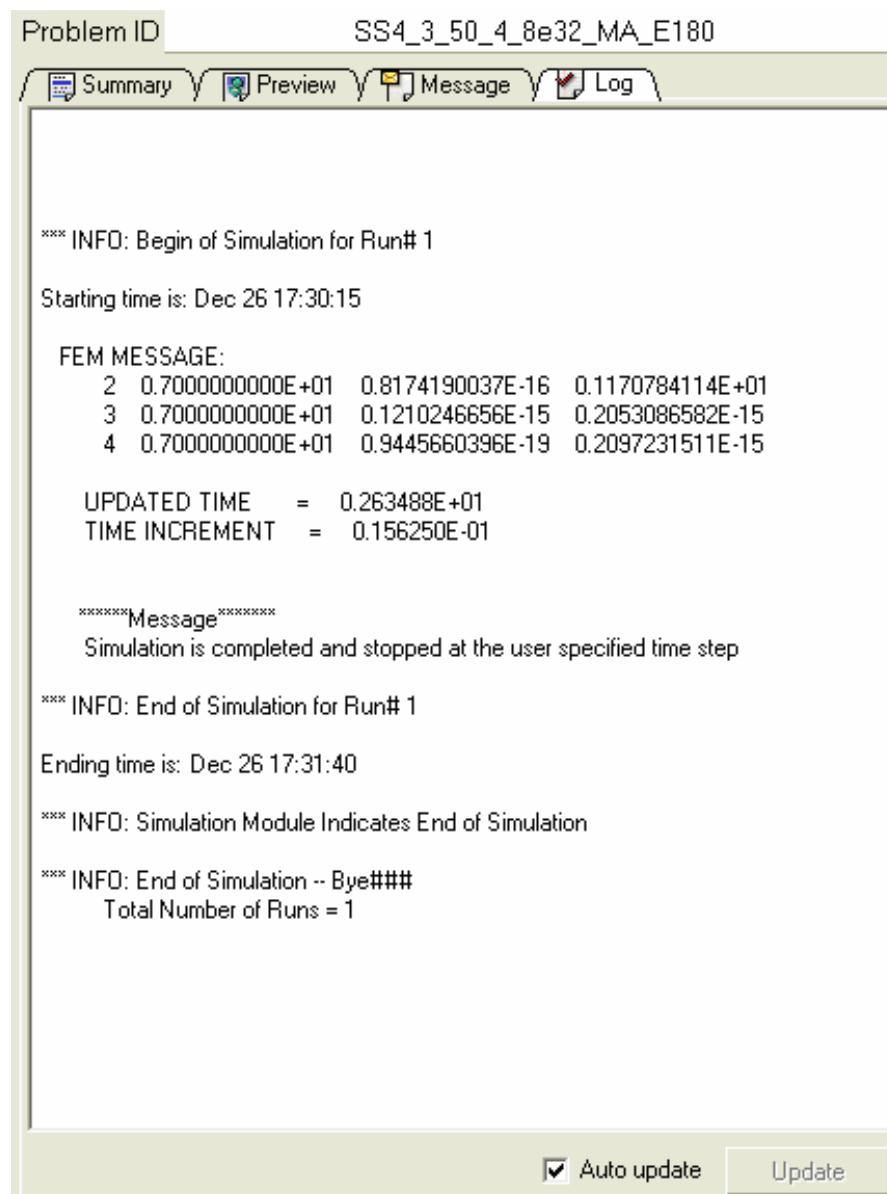


Figura 2.18: Ejemplo mensaje de hora de comienzo y finalización de una simulación.



2.9. Resultados del modelo con todas las condiciones Standard

Con todas las condiciones estándares explicadas anteriormente se ha realizado una simulación. A continuación vemos un resumen de las condiciones estándares para la realización del modelo:

- *Geometría:*

Chapa de espesor 4mm
Matriz de abertura $V = 8 \cdot e = 32\text{mm}$
Macho con radio de $r = 1,5\text{mm}$
Ancho de chapa $A = 50\text{mm}$

- *Mallado:*

Chapa con mallado simétrico. Mallado fino en contactos chapa-apoyos y chapa-macho
Matriz y macho sin mallado ya que son elementos rígidos

- *Material:*

El material de la chapa estudiada es el Acero Inoxidable AISI304
Módulo de elasticidad $E = 200\text{GPa}$
Tanto macho como matriz se definen sin material

- *Condiciones de contorno:*

Los apoyos no se mueven en ninguna dirección
El macho se mueve con una velocidad $y = -7\text{mm/seg.}$ en el descenso y
de $y = +7\text{mm/seg.}$ en el ascenso del mismo

- *Otras condiciones:*

300 pasos para recorrer en la bajada 14,4mm
40 pasos para recorrer en la subida 4,375mm
Coeficiente de rozamiento de 0,2
Valor de tolerancia de 0,01mm

En un primer momento vamos a explicar la nomenclatura de las simulaciones realizadas con el programa DEFORM 2D. El modelo con todas las condiciones estándares se ha denominado:

SS4_3_50_8e32_MA_std2

SS4 → Acero inoxidable AISI 304 (Stainless Steel AISI 304)
3 → Diámetro del punzón o macho en mm
50 → Ancho de la chapa en mm
8e32 → Abertura de la matriz, 8 veces el espesor, es decir 32mm
MA → Se ha usado malla afinada en las cercanías del macho y de los apoyos
std2 → Haciendo referencia al caso estándar

En algunos casos en concreto se añade a la nomenclatura del caso el valor específico del coeficiente de rozamiento o el valor del módulo de elasticidad. Esto es debido a la comparación entre casos en los que permanece constante el coeficiente de rozamiento o el módulo de elasticidad.

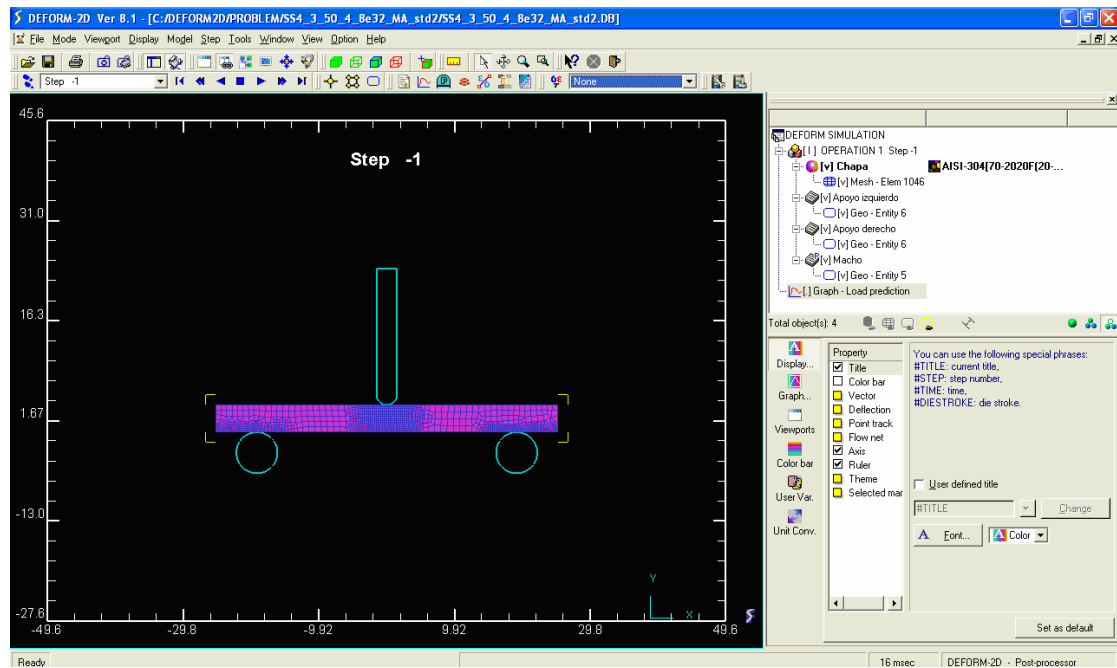


Figura 2.19: Modelo con las condiciones estándares.

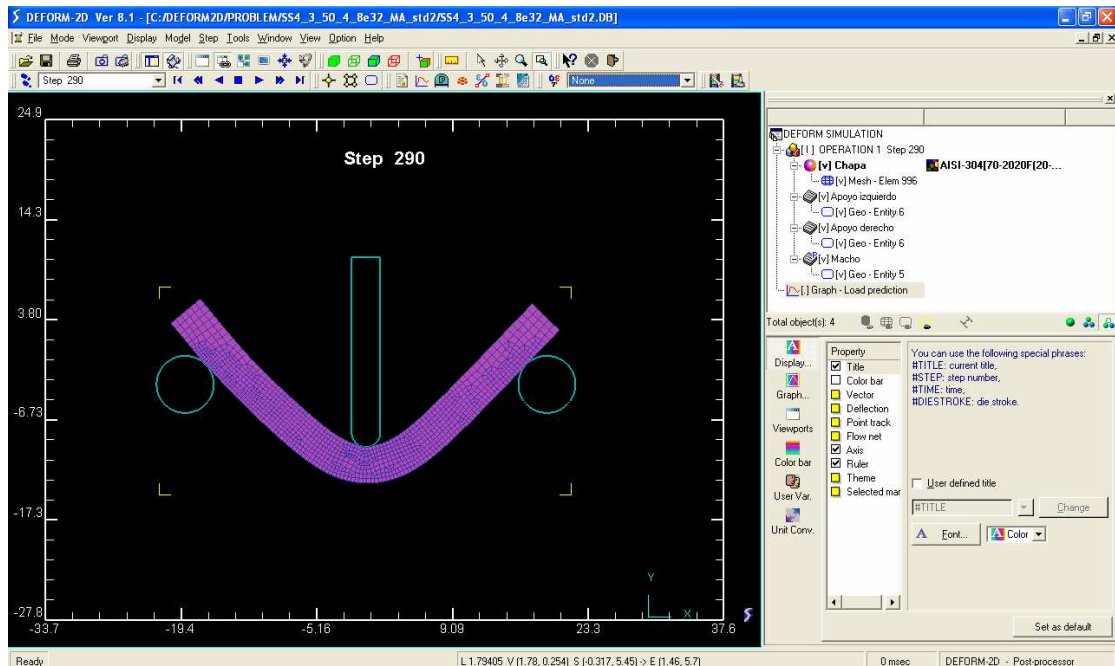


Figura 2.20: Modelo estándar a los 87°.

Como ya se explicó anteriormente, el descenso del macho sólo se produce hasta que se obtiene un valor cercano a los 87° para poder tener un ángulo final de plegado de aproximadamente 90° , debido al efecto springback del material elastoplástico utilizado. En este caso, se ha escogido un valor de STEP 290, en el que obtenemos un valor de $87,82^\circ$. Este valor viene influenciado por el tamaño del step. Si se hubieran introducido más número de steps con un valor de descenso o ascenso más pequeño, nos podríamos acercar más al valor de los 87° , pero esto afectaría al valor de tiempo de análisis del ángulo, aumentando su valor.

Para el cálculo del ángulo en los steps tomamos valores de puntos en la superficie exterior de la chapa. Se ha de decir que los puntos deben cogerse de la zona más alejada del macho para poder tener una buena aproximación a una recta. Tomaremos dos puntos de la parte de la derecha y dos puntos de la parte de la izquierda usando la condición de simetría, se calcularán las correspondientes rectas y seguidamente el ángulo que forman entre ellas.

CASO		LADO	X1	Y1	X2
SS4_3_50_4_8e32_MA_std2	DESCENSO MACHO	\	-17,442400	5,471490	-11,663300
STEP 290		/	17,442400	5,471490	11,663300
	SPRINGBACK	\	-17,725600	5,562500	-8,934520
		/	17,725600	5,562500	8,934520

Y2	PENDIENTE=m	Arctg= θ_i	rad=>grados	ÁNGULO CHAPA(grados)	REC
-0,531519	-1,038745	-0,80440003	-46,0887267	87,82254661	-3,67590399
-0,531519	1,038745	0,80440003	46,0887267		
-3,068810	-0,981826	-0,77622803	-44,47459045	91,0508191	
-3,068810	0,981826	0,77622803	44,47459045		

Figura 2.21: Cálculo del ángulo que forma la chapa estándar.

Una vez visto en que step se produce un ángulo cercano a los 87° se procede a la simulación de la subida del macho con las condiciones explicadas anteriormente. Para ello se toma como valor inicial de la subida el step en el que se produce el ángulo cercano a los 87° .

De igual forma, como se puede observar en las dos últimas filas de la figura 2.21, se calcula el ángulo que forman las dos semialas de la chapa una vez que ha subido el macho.

Una vez calculados los dos ángulos, se procede al cálculo de la recuperación o springback en tanto por ciento. Para ello se procede como sigue:

$$Re\ c = \frac{b - a}{a} \times 100$$

Siendo:

- a → Valor del ángulo cuando el macho está en contacto, es decir, el valor del ángulo cercano a los 87°, o ángulo inicial.
- b → Valor del ángulo cuando el macho ha subido, es decir, el valor del ángulo cercano a los 90°, o ángulo final.

Como se ha analizado con anterioridad el valor de recuperación de los aceros inoxidables austeníticos AISI 304 está en torno al 2-4%. En la simulación se obtiene un valor de 3,67%, valor muy aproximado al comportamiento general de este material. El ángulo escogido para realizar la subida del macho no era 87° sino 87,8°. Se escogió el step 290, ya que en un step inmediatamente superior e inferior se obtenían valores de 85° y 89° respectivamente, viéndose cómo estas cantidades se separan de forma cuantiosa del valor de los 87° deseados.

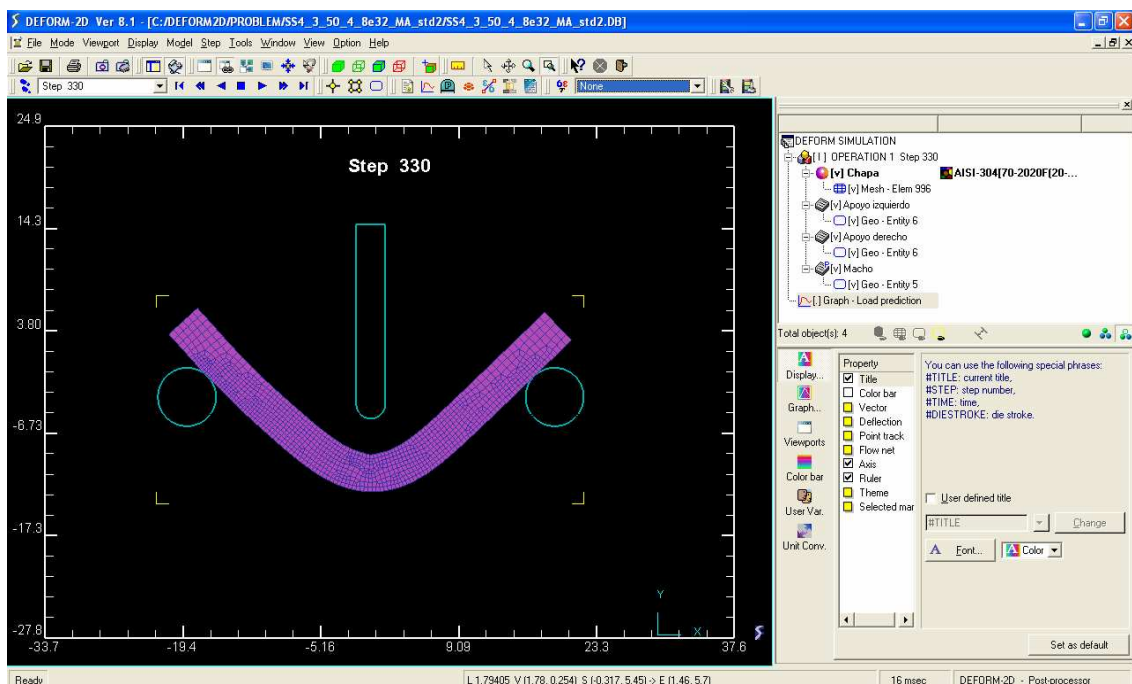


Figura 2.22: Modelo estándar una vez subido el macho.

2.9.1. Velocidad de deformación máxima a 90°

La velocidad de deformación se define como la variación de la deformación con respecto al tiempo. Las unidades de este parámetro son [1/seg.] ya que la definición de deformación no tiene unidades.

Para la caracterización del material se realiza un ensayo de tracción simple, como ha sido explicado con anterioridad. Este ensayo se realiza de forma muy lenta, por tanto el valor de la velocidad de deformación en el ensayo es un valor pequeño.

Sin embargo, la velocidad a la que se realiza el plegado en la simulación es la velocidad de trabajo de una prensa plegadora, en este caso, un valor de 7mm/seg. Esta velocidad es mayor que la obtenida en el ensayo de tracción.

A la hora de introducir el material AISI 304 estudiado en la simulación del programa DEFORM 2D mediante su curva tensión-deformación, nos encontramos con varios valores de estas curvas según la velocidad de deformación.

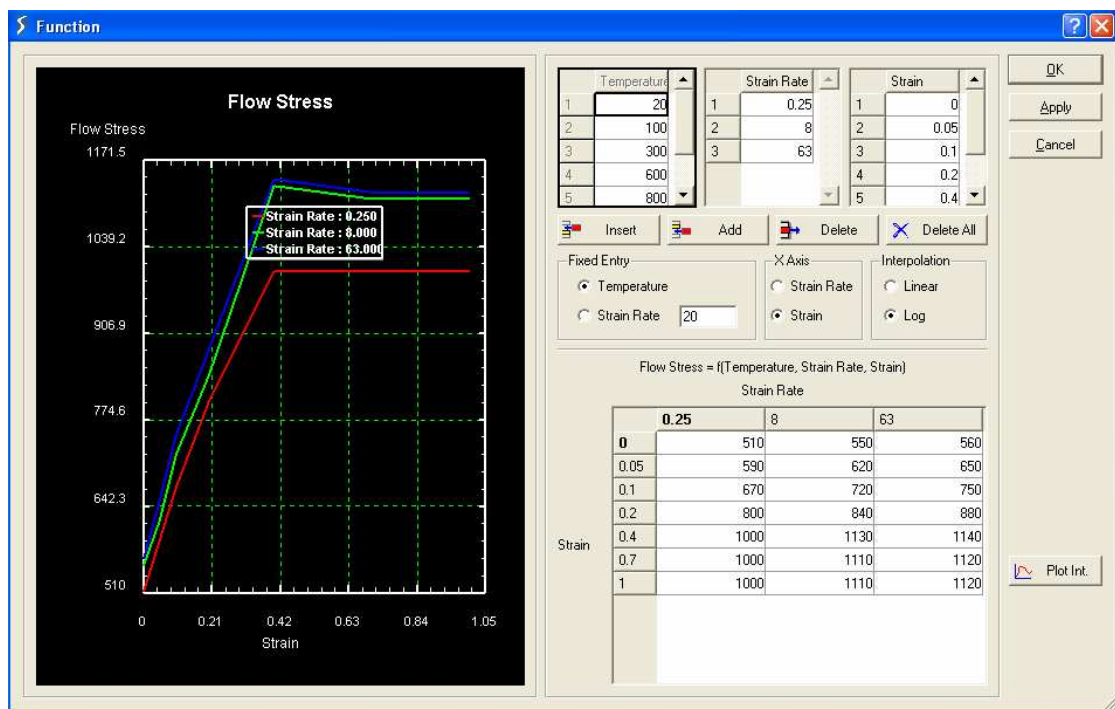


Figura 2.23: Curvas tensión-deformación según la velocidad de deformación.

En un primer momento se elige la curva con menor velocidad de deformación $0,25\text{seg}^{-1}$ y se introducen los valores de tensión para determinados puntos de deformación (se han escogido los puntos correspondientes a la deformación definida por el programa) según la curva tensión-deformación obtenida en el ensayo real.

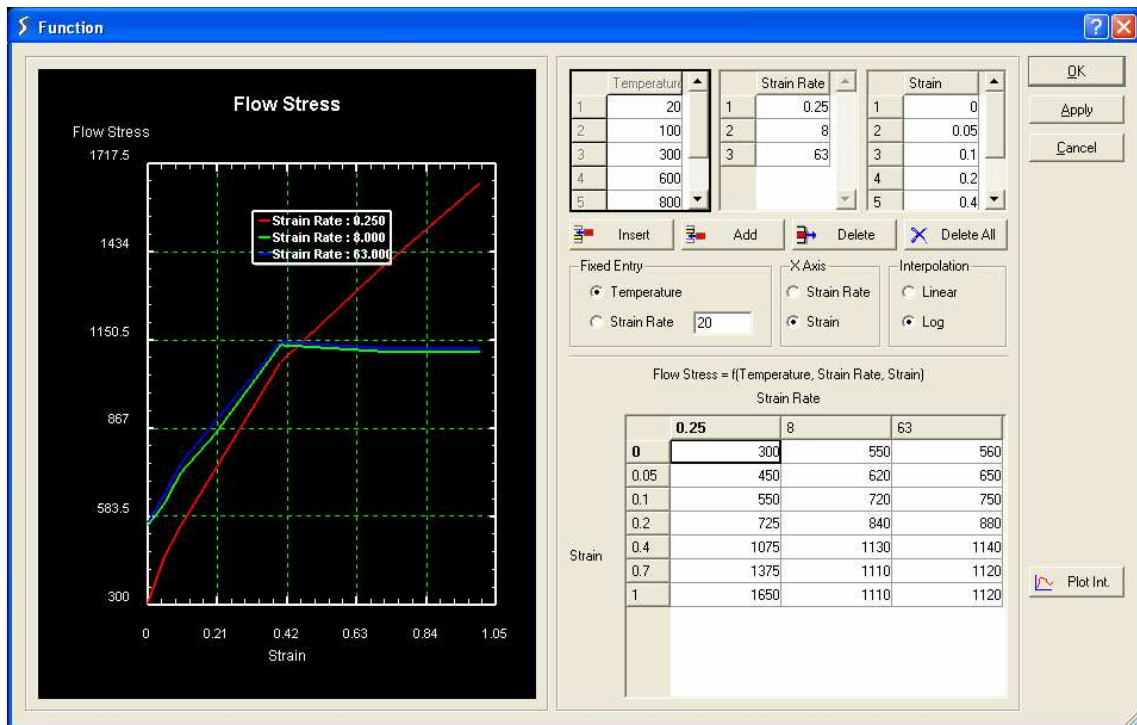


Figura 2.24: Curva tensión-deformación real introducida en DEFORM 2D.

Se ve una clara diferencia a partir de un valor de deformación aproximado a 0,42. Los valores obtenidos metiendo la caracterización del material hecha con el ensayo de tracción difieren de los valores en el plegado de las chapas. Esto es debido a la velocidad de deformación.

Como hemos comentado, en la biblioteca del programa DEFORM 2D está definido el acero austenítico AISI 304 mediante varias curvas dependiendo de la velocidad de deformación. Esta biblioteca se ha realizado a partir de numerosos ensayos en dicho material, por tanto tenemos mayor fiabilidad y opciones en el programa. Durante la simulación, el programa va ajustando la velocidad de deformación, interpolando entre las curvas. Mediante este método se obtiene un valor más cercano al obtenido en el plegado real. Por tanto, se decidió para el transcurso de este proyecto elegir el material definido por el programa de elementos finitos, ya que se obtendría un error final menor en los resultados.

Se analiza el valor de la velocidad de deformación máxima para 90°, obteniéndose el siguiente gráfico:

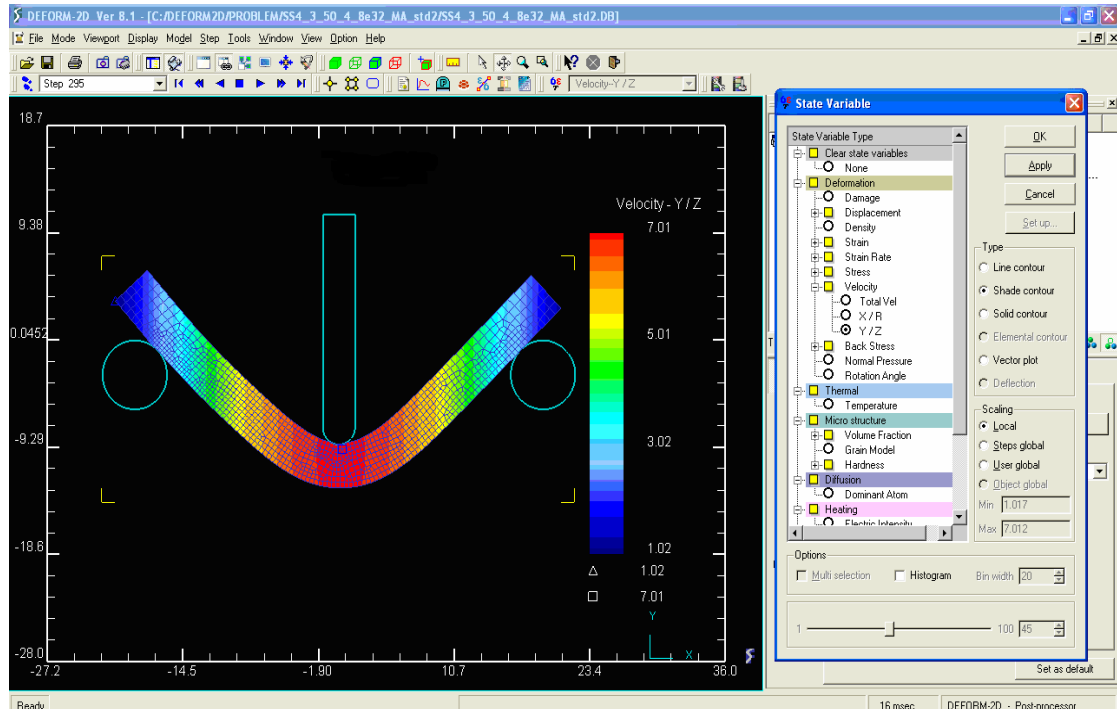


Figura 2.25: Velocidad máxima de deformación.

La velocidad máxima de deformación se da en la zona central de la chapa debido a la acción del macho y se da en el último step de la bajada del punzón, es decir en el step más cercano a 87° para luego obtener un ángulo final de 90° aproximado. Se ha obtenido un valor máximo de $7,012 \text{ seg}^{-1}$.

2.9.2. Fuerza

A continuación mostraremos el gráfico de la fuerza según el recorrido del macho. Varios puntos se alejan de la continuidad de la curva y salen divergentes debido al método de cálculo por elementos finitos. Esto es debido a que la solución no converge con los límites ya que para determinados momentos pueden llegar a ser muy excluyentes. Esto puede ocurrir debido al tamaño del step, al tamaño de la banda de tolerancia...

En la gráfica que nos proporciona el programa están todos los puntos de cálculo. Nosotros sólo tenemos los resultados de los puntos del step según el paso elegido.

En cada step se guardan todos los datos de la simulación, por tanto, tenemos todos los datos de la fuerza [N/m] y del desplazamiento [mm] ocurridos en cada paso. Con esos datos tomados de cada step realizamos una gráfica e interpolamos los puntos divergentes para conseguir continuidad en la resultante.

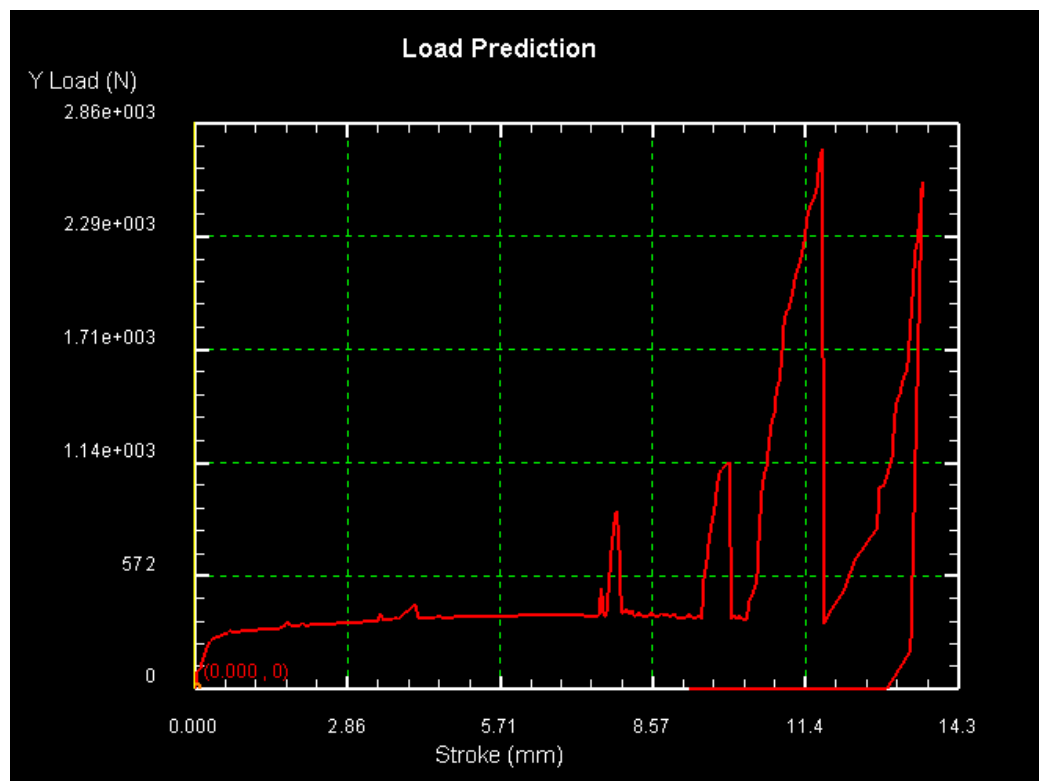


Figura 2.26: Curva Fuerza- Desplazamiento DEFORM 2D.

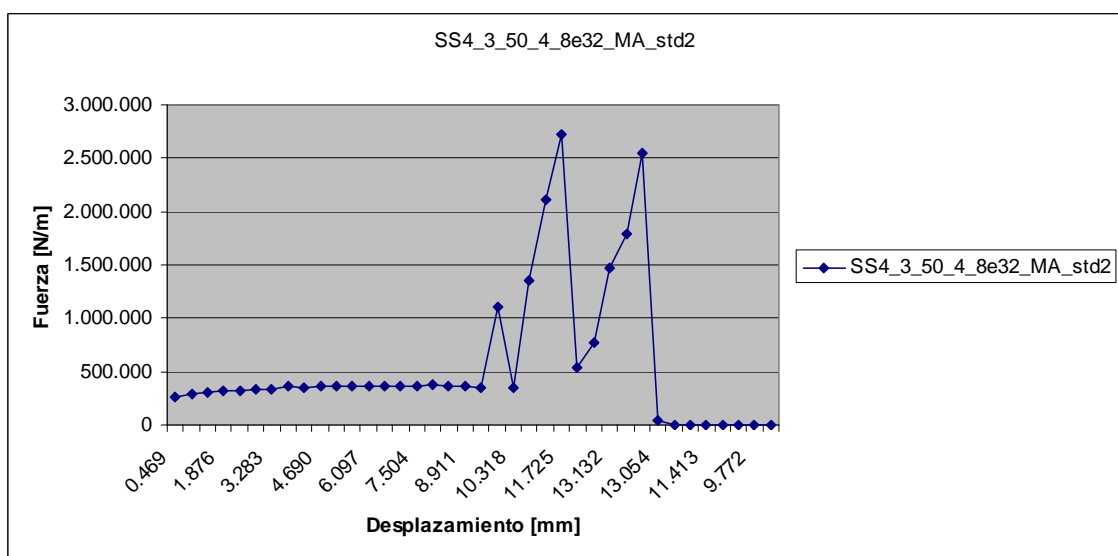


Figura 2.27: Extracción resultados de cada step sin interpolar.

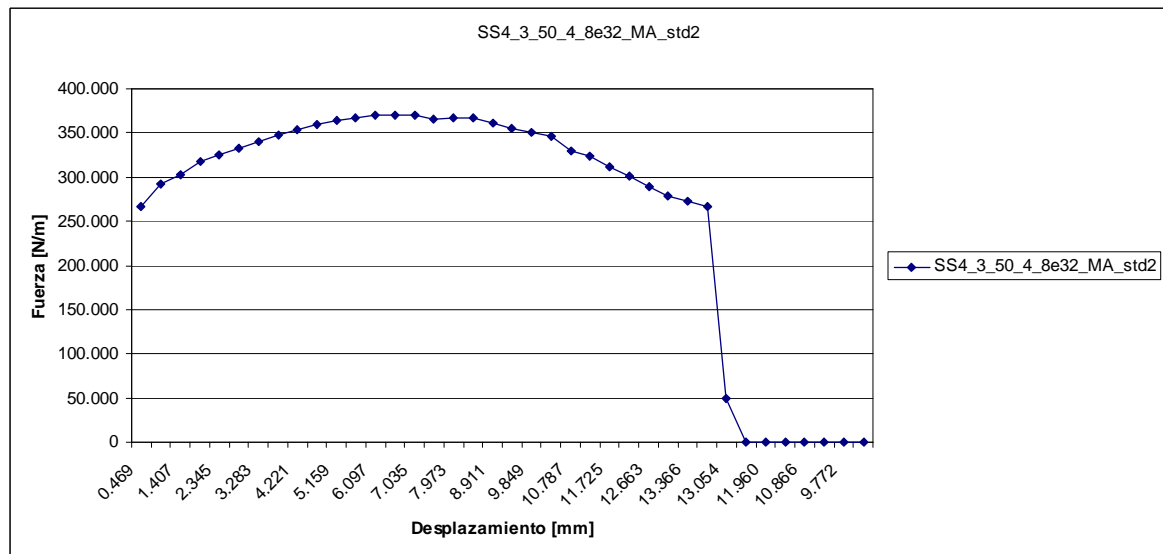


Figura 2.28: Curva Fuerza-Desplazamiento interpolada.

Como se puede apreciar, después de la interpolación, la curva se asemeja a las curvas a las que estamos acostumbrados a ver. Se podría pensar que mediante la interpolación se pierden datos al intentar hacer una aproximación, pero la interpolación se ha hecho en los puntos no conflictivos de la simulación. Como puntos conflictivos o, mejor dicho, puntos de riesgo se han considerado los puntos más cercanos al punto de fuerza máxima. Es decir, no se han interpolado puntos que pudieran estar muy próximos al punto de fuerza máxima ya que se podría encontrar gran diferencia con los resultados reales obtenidos.

Analizando la gráfica nos encontramos con el punto de Fuerza máxima en un recorrido de 6,566mm de valor 370,263KN.

	6,097	369,377
FUERZA MÁXIMA EN:	6,566	370,263
	7,035	369,928

2.9.3. Recuperación

En el plegado de chapas es de vital importancia la influencia del springback o recuperación del material a la hora de conseguir el ángulo final deseado. Esto es debido a la parte elástica del material. Dependiendo del material se tendrá una mayor o menor recuperación.

La recuperación de los inoxidables es función de la abertura de la matriz, del espesor de la chapa, del módulo de elasticidad, del material y del ángulo de plegado.

Para los ángulos típicos de 90° , los inoxidables del tipo AISI 304 recocidos recuperan de 2 a 4° para radios comprendidos entre el espesor y 6 veces el espesor. Por tanto los valores esperables de la recuperación en el plegado son del orden del 96 al 98%.

En la operación de plegado se puede reducir o anular el error de ángulo reduciendo el radio del punzón, clavando la chapa contra la matriz o doblando a un ángulo previo inferior que compensa la recuperación, es decir, modificando el recorrido del macho.

En el estudio del proyecto el radio del punzón no se ha modificado (salvo para ver el efecto que produce en la fuerza una variación del mismo) y el plegado se produce al aire, por tanto la acción a tomar para reducir el efecto del springback consiste en doblar a un ángulo previo inferior. Como la recuperación es del orden del 96 al 98% se ha doblado la chapa hasta conseguir un ángulo previo de 87° . Con las condiciones estándar consideradas vemos que en la simulación conseguimos un ángulo de $87,82^\circ$ conseguido en el step 290, correspondiente a un recorrido de 13,6. Se podría haber tomado un valor más cercano a los 87° si se hubieran tomado número de steps menor para grabar los resultados.

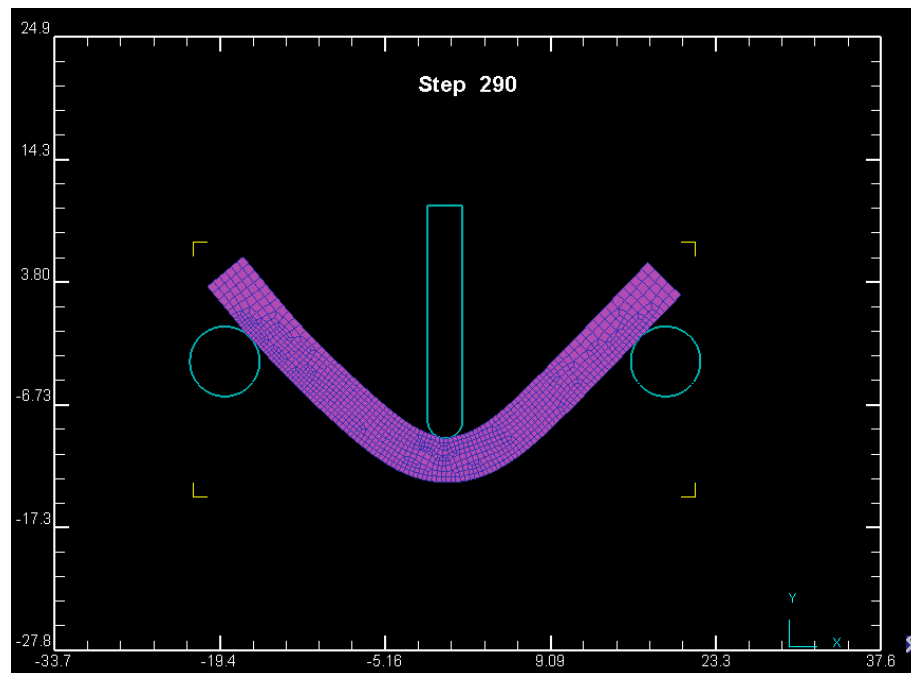


Figura 2.29: Ángulo previo cercano a los 87°

Para el cálculo del ángulo en los distintos steps tomamos valores de puntos en la superficie exterior de la chapa. Se ha de decir que los puntos deben cogerse de la zona más alejada del macho para poder tener una buena aproximación a una recta. Tomaremos dos puntos de la parte de la derecha y dos puntos de la parte de la izquierda del eje de simetría. Se calcularán las correspondientes rectas y seguidamente el ángulo que forman entre ellas.

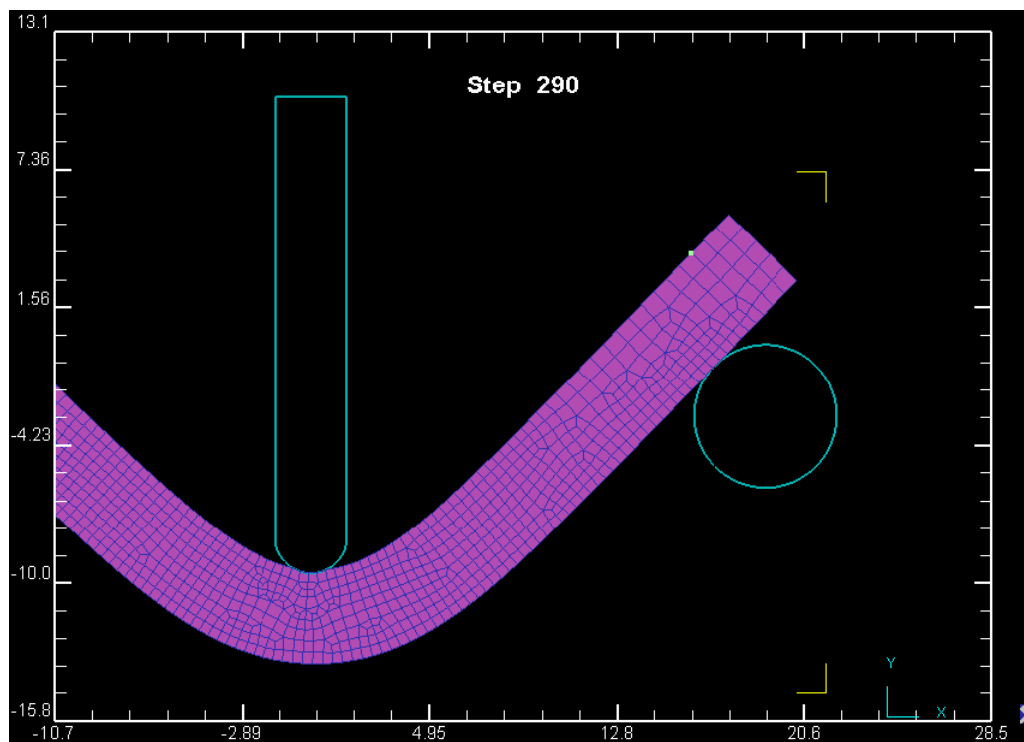


Figura 2.30: Elección de puntos para el cálculo del ángulo inicial

CASO		LADO	X1	Y1	X2
SS4_3_50_4_8e32_MA_std2	DESCENSO MACHO	\	-17,442400	5,471490	-11,663300
STEP 290		/	17,442400	5,471490	11,663300
	SPRINGBACK	\	-17,725600	5,562500	-8,934520
		/	17,725600	5,562500	8,934520

Y2	PENDIENTE=m	Arctg= θ_i	rad=>grados	ÁNGULO CHAPA(grados)	REC
-0,531519	-1,038745	-0,80440003	-46,0887267	87,82254661	-3,67590399
-0,531519	1,038745	0,80440003	46,0887267		
-3,068810	-0,981826	-0,77622803	-44,47459045	91,0508191	
-3,068810	0,981826	0,77622803	44,47459045		

Figura 2.31: Cálculo del ángulo inicial chapa estándar

Una vez visto en qué step se produce un ángulo cercano a los 87° se procede a la simulación de la subida del macho con las condiciones explicadas anteriormente. Para ello se toma como valor inicial del ascenso el step en el que se produce el ángulo cercano a los 87°.

De igual forma, como se puede observar en las dos últimas filas de la figura 2.31, se calcula el ángulo que forman las dos semialas de la chapa una vez que ha subido el macho. Una vez calculados los dos ángulos, se procede al cálculo de la recuperación o springback en tanto por ciento. Para ello se procede como sigue:

$$Re\ c = \frac{b - a}{a} \times 100$$

Siendo:

- a ➔ Valor del ángulo cuando el macho está en contacto, es decir, el valor del ángulo cercano a los 87°, o ángulo inicial.
- b ➔ Valor del ángulo cuando el macho ha subido, es decir, el valor del ángulo cercano a los 90°, o ángulo final.

Como se ha comentado anteriormente el valor de la recuperación de los aceros inoxidables austeníticos AISI 304 está en torno al 2-4%. En la simulación se obtiene un valor de 3,67%, valor muy aproximado al comportamiento general de este material. Como ya se comentó el ángulo escogido para realizar la subida del macho no era 87° sino 87,8°. Se escogió el step 290, ya que en un step inmediatamente superior e inferior se obtenían valores de 85° y 89° respectivamente, viéndose cómo estas cantidades se separan de forma cuantiosa del valor de los 87° deseados.

2.9.4. Tensiones

Las tensiones máximas obtenidas del caso estándar se dan en el step 285 que es el penúltimo paso de la bajada del macho.

Se obtiene en DEFORM 2D un gráfico de color en el que se aprecia que la parte interior está sometida a compresión, con un valor negativo de la tensión y la parte exterior con un valor positivo está sometida a tracción.

Obteniéndose unos valores de tensión a compresión y tracción de aproximadamente 996 MPa. Los valores de compresión y tracción teóricamente deben ser iguales, esto ocurre considerando la fibra neutra en la zona central de la sección. Se ha demostrado con la práctica que la fibra neutra tiende a desplazarse hacia arriba, es decir hacia la zona de la compresión, y por eso los valores pueden a veces no ser iguales. En las simulaciones se podrían tener valores distintos debido a la no realización de un mallado central correcto.

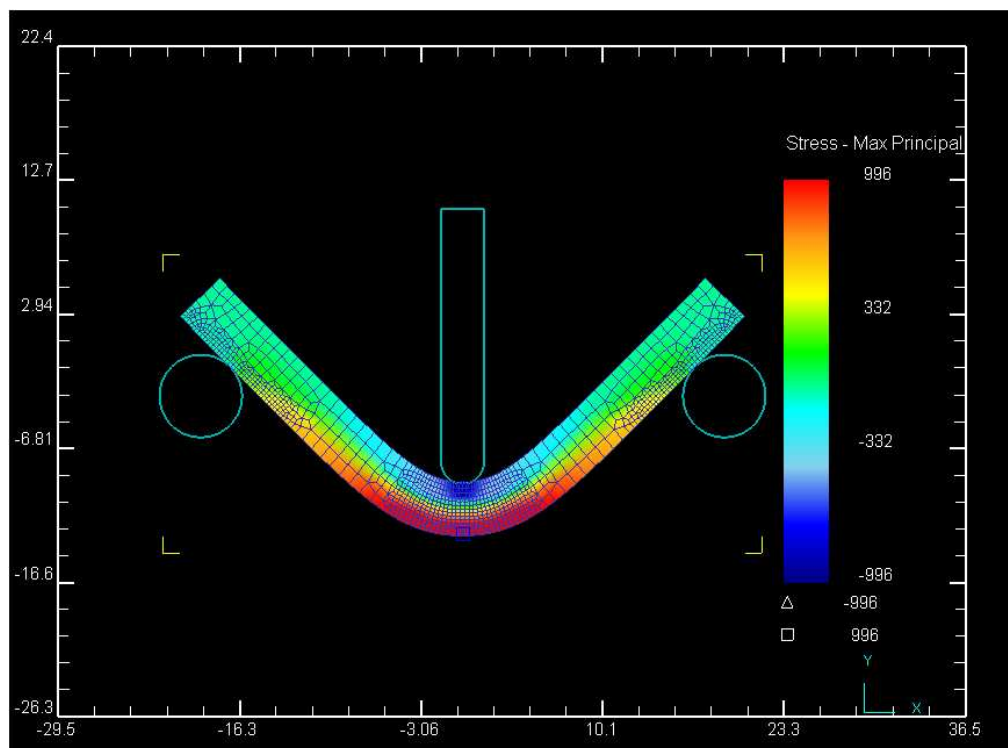


Figura 2.32: Tensiones máximas

2.9.5. Deformaciones

En este apartado vamos a analizar las deformaciones máximas para 90° . La mayor deformación, medida en milímetros sucede en el Step 285. Para este step el macho con la velocidad de 7mm/seg. ha recorrido 13,37mm en su bajada.

En la gráfica se puede observar cómo se produce una mayor deformación en la zona a tracción, debido al desplazamiento de la fibra neutra hacia la zona de la compresión. Se identifica el valor a tracción como negativo mientras que el valor de compresión a positivo ya que son opuestos.

Este valor de la deformación máxima no tiene por qué darse en el momento en el que sucede la tensión máxima. Como se puede observar, ambos ocurren en distintos valores de Step.

Obtenemos un valor de deformación a tracción y a compresión de 0,366. Ambos valores se dan en la zona central de la chapa y más concretamente en la zona donde pasa el eje central del punzón.

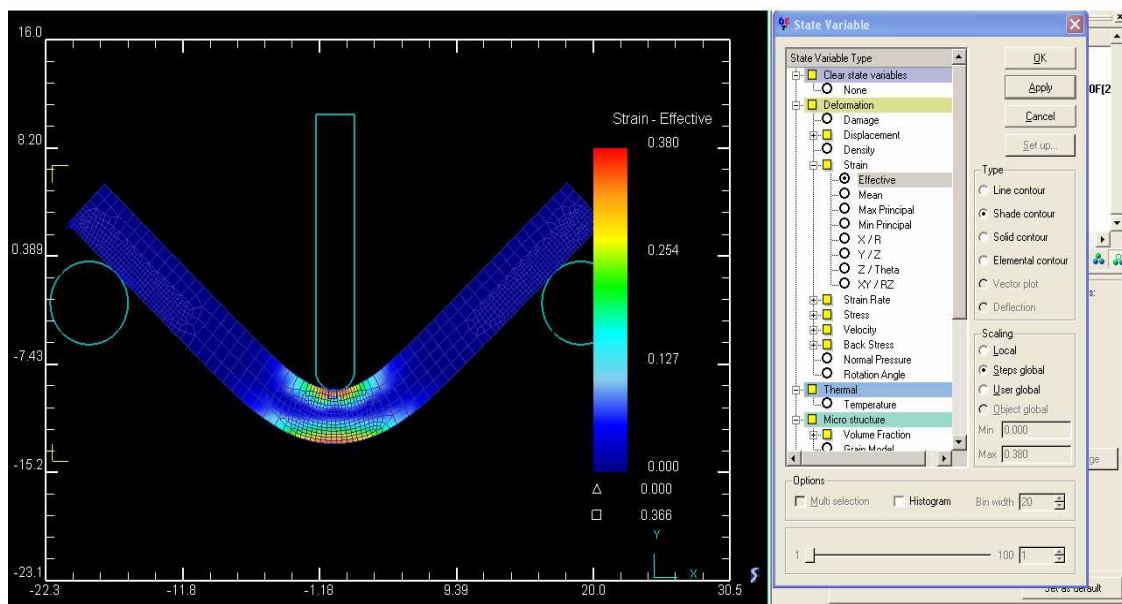


Figura 2.33: Valores de deformaciones máximas



3. Sensibilidad del modelo

En este apartado se van a analizar la variación de la fuerza y de la recuperación cuando variamos algunas condiciones en las simulaciones de plegado.

Se entiende como sensibilidad del modelo a la relación entre las variaciones relativas de la fuerza o recuperación y al del parámetro sobre el que se considera la sensibilidad. De esta forma se puede evaluar de antemano la importancia de la exactitud del valor que se establece en el parámetro de plegado.

3.1. Sensibilidad del modelo al tamaño de los elementos

En esta sección no se varía la relación entre los elementos de la malla fina y de la malla más gruesa manteniendo el mismo número de elementos del mallado total, sino que hacemos el estudio variando el número de elementos que se encuentran en el mallado.

Realizar un mallado simple teniendo el mismo tamaño los elementos nos daría un resultado más alejado de la solución buscada, aunque el ensayo se realizaría en un menor espacio de tiempo. Por eso se realiza un mallado más afinado en las zonas de interés. En nuestro caso las zonas de interés son las zonas en las que existe contacto, entre la chapa y los apoyos y la zona de contacto entre la chapa y el punzón. Se intenta hacer un mallado simétrico con respecto al eje del punzón.

En el caso estándar se ha realizado un mallado con una relación entre elementos de 1,2 y con un número de elementos total de 1000. Se ha realizado otro ensayo con las mismas condiciones que las estándares pero cambiando el número de elementos en el mallado (manteniendo la misma relación entre ellos). En este otro caso se ha elegido un número de 2000 elementos. La elección del número de elementos en la malla no deja de ser un dato a tener en cuenta, ya que el número excesivo provocaría un aumento considerable del tiempo de cálculo, con la posible no convergencia del mismo, con lo que usar una herramienta informática de este tipo carecería de lógica. El tamaño de los elementos será más pequeño pero se mantiene constante la relación existente entre los elementos del mallado grueso y los pertenecientes al mallado más fino.

Analizaremos la fuerza y la recuperación y se hará una comparación entre los mismos. Vemos la diferencia entre las dos chapas debido a este número de elementos.

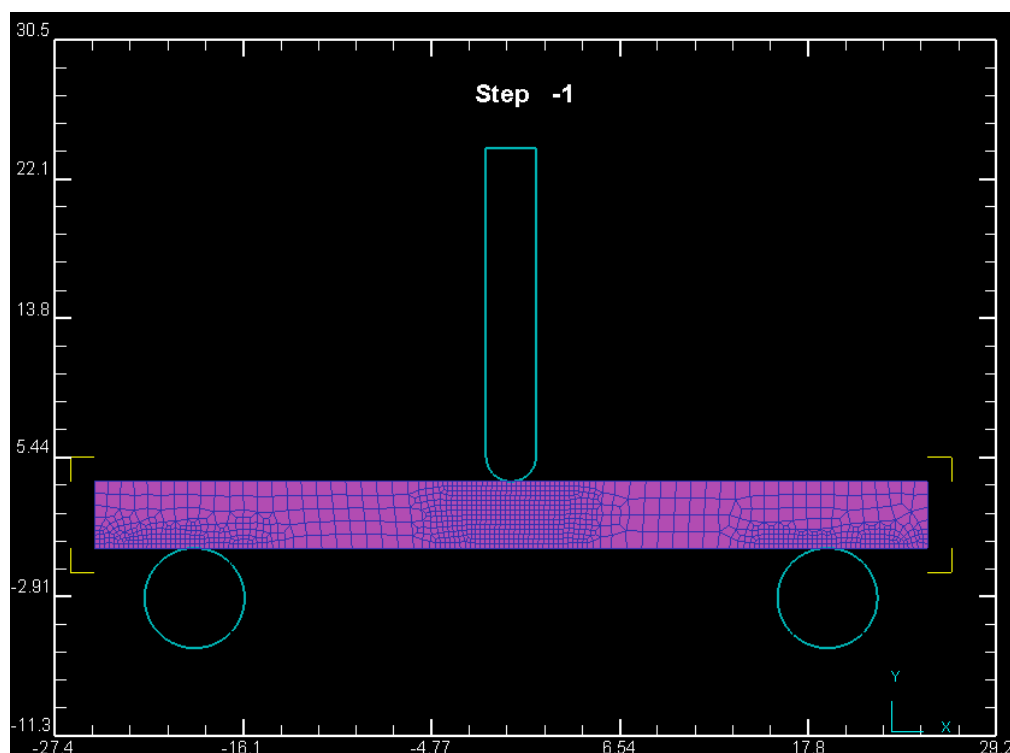


Figura 3.1: Elementos de la chapa en el caso estándar, 1000 elementos

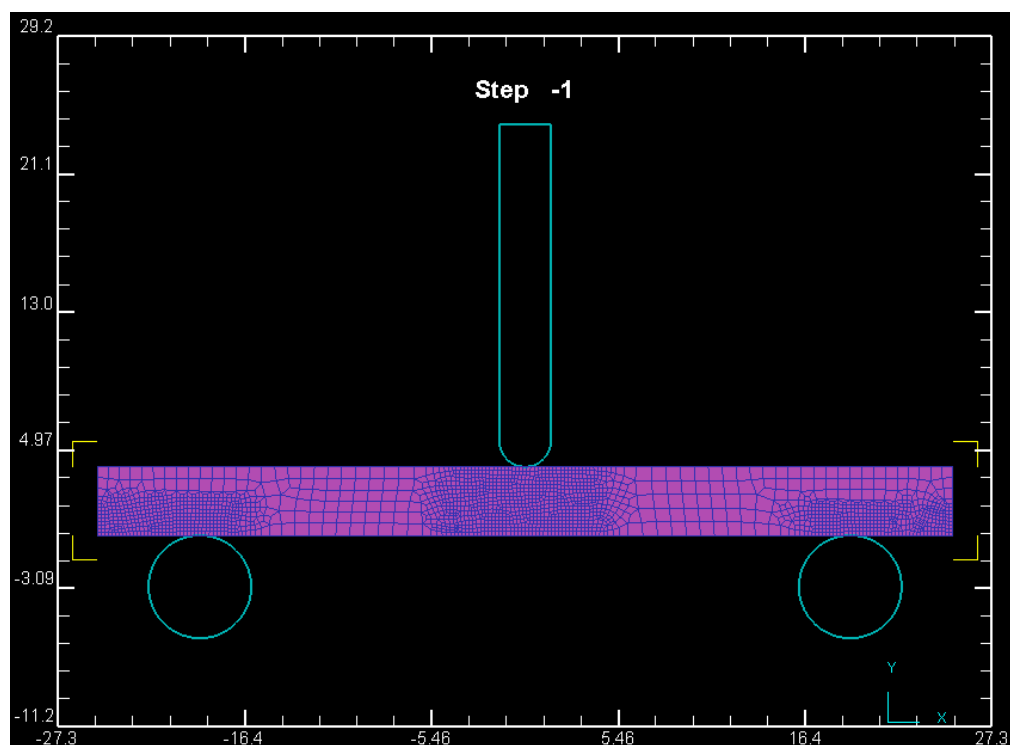


Figura 3.2: Visualización de la chapa con 2000 elementos

Se puede apreciar claramente la diferencia en la zona de mallado fino al poner un número mayor de elementos.

A continuación exponemos la curva fuerza-desplazamiento del ensayo realizado con 2000 elementos. Como se puede observar se ven bastantes puntos de divergencia, esto es debido a que el cálculo cada vez resulta más largo ya que al haber tantos elementos el programa tiene que hacer muchas operaciones matemáticas con la consiguiente acumulación de error, que hace que se lleguen a puntos de divergencia.

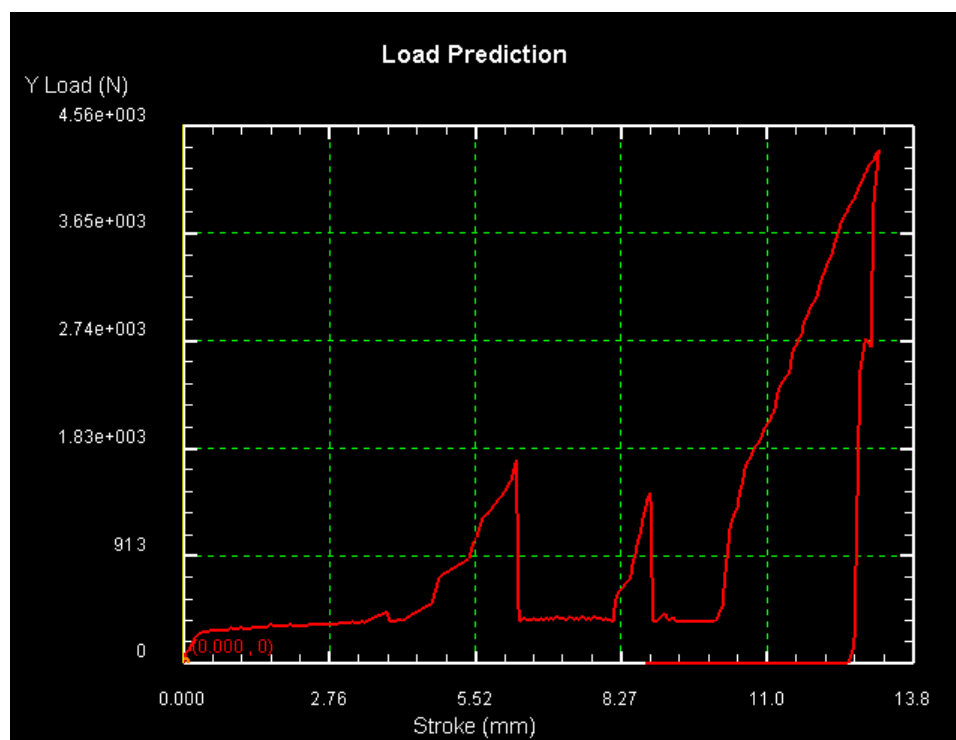


Figura 3.3: Curva Fuerza-Desplazamiento en el ensayo de 2000 elementos

Se han extraído los valores obtenidos de cada step (recordamos que se estableció que se guardaban los datos cada 10 steps), y se han introducido en una tabla Excel. Los valores divergentes se han interpolado para poder obtener la gráfica lo más suave y continua posible sin alejarnos de los valores correctos. Como resultado se ha obtenido el siguiente gráfico:

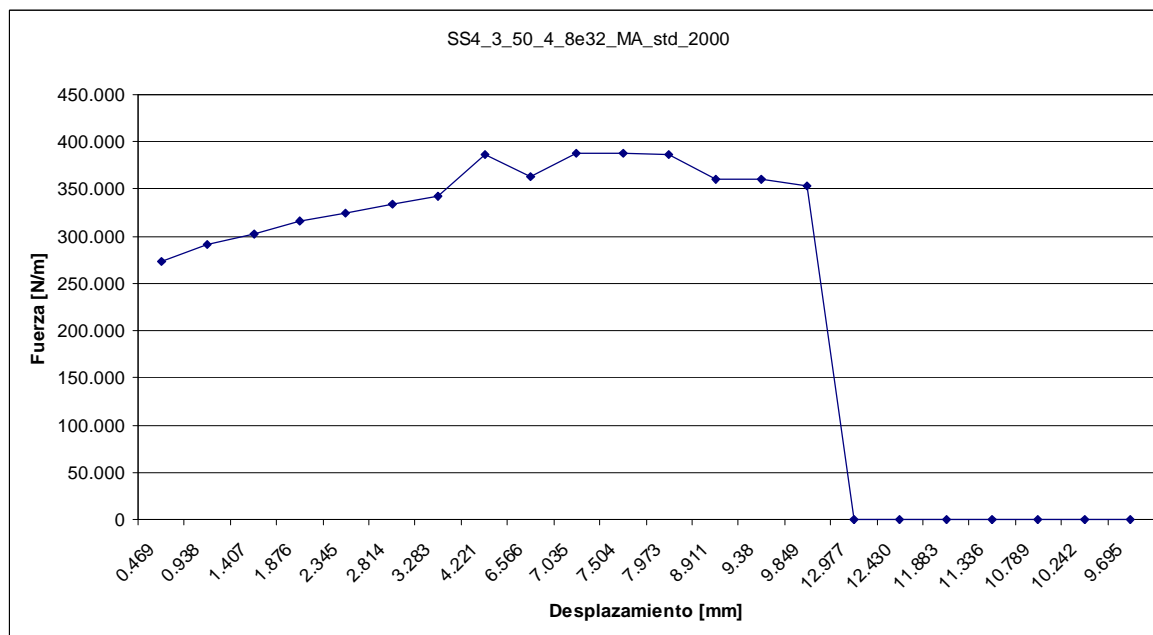


Figura 3.4: Gráfica Fuerza-Desplazamiento para 2000 elementos interpolada.

En este gráfico destaca un punto para un desplazamiento de 4,22mm que no se ha considerado como el punto donde se ejerce la fuerza máxima ya que se puede ver con claridad que ese punto estaría un valor en ordenadas menor que el dibujado. Este punto corresponde a un punto de divergencia inicial en la curva hallada por el programa DEFORM 2D.

Se va a proceder a la comparación entre las curvas obtenidas en el caso estándar y en el caso con 2000 elementos. Para su representación gráfica se han sustraído los steps en los que se han obtenidos valores muy elevados y hacían que el punto fuera divergente.

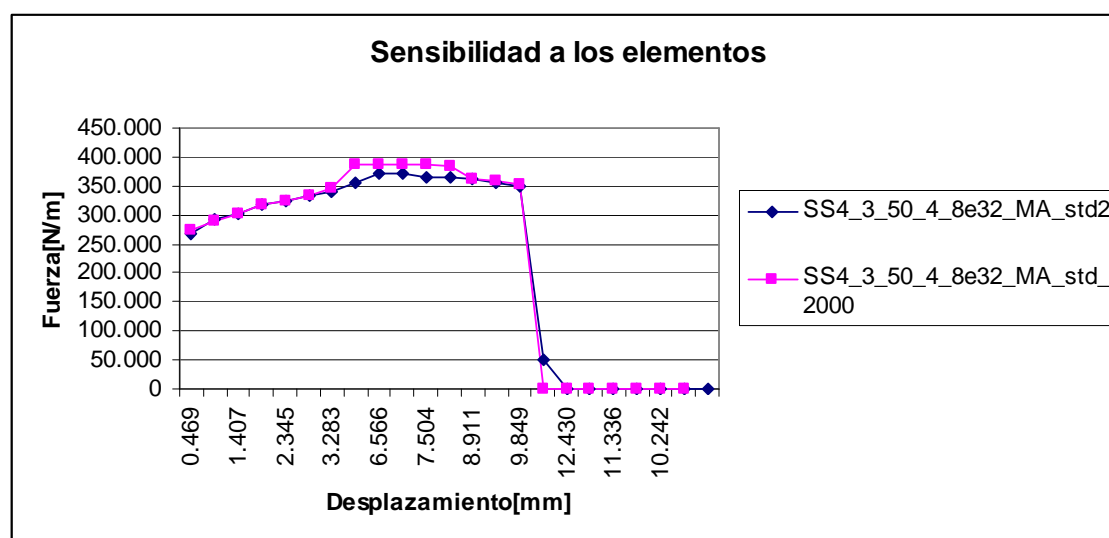


Figura 3.5: Sensibilidad al modelo al número de elementos

Como se puede comprobar las curvas son muy parecidas. Del caso de 2000 elementos se va a despreciar el punto cuyo valor se dispare. En la simulación de mayor elementos obtenemos unos valores superiores que en el caso estándar. En teoría debería dar un valor más cercano al real pero debido a la acumulación del error y a los puntos divergentes, nos dan unos valores superiores.

Veamos en la siguiente tabla la relación entre las dos curvas:

Parámetros geométricos	SS4_3_50_4_8e32_MA_std2	SS4_3_50_4_8e32_MA_std_2000
Longitud	50	50
Espesor	4	4
Abertura	32	32
Radio punta	3	3
Nº Elementos	1000	2000
Desplazamiento (mm)	FUERZAS (N/m)	FUERZAS (N/m)
0,469	266.580	272.704
0,938	292.657	290.679
1,407	302.483	301.690
1,876	317.489	316.429
2,345	325.074	323.896
2,814	332.788	333.900
3,283	339.648	345.306
4,221	354.176	385.836
6,566	370.263	387.103
7,035	369.928	386.103
7,504	366.287	385.700
7,973	366.504	385.000
8,911	361.427	360.855
9,380	354.863	359.988
9,849	350.406	353.130

Tabla 3.1: Variación de la fuerza de plegado con el número de elementos

Por tanto el programa de elementos finitos permite variar el número de elementos en la malla y ver la variación de la fuerza de plegado. El número de elementos se **ha aumentado un 100%** pasando de 1000 elementos a 2000 elementos. Al hacer esta variación tenemos que la Fuerza máxima ha aumentado pasando de los 370,263 KN/m iniciales a 387,103 KN/m finales. La tabla 3.1 recoge los valores fuerza-desplazamiento del caso estándar frente a los obtenidos después de aumentar el número de elementos en un 100%.

Como se puede observar analizando los datos de la tabla 3.1, tenemos que la variación de la fuerza máxima de plegado es de 4,55%. No es una diferencia excesiva ya que no supera el 10%.



Por tanto, elevar el número de elementos no resulta tan beneficioso como se pensaba al principio ya que no se ha sufrido una gran variación de la fuerza frente al valor estándar. El valor estándar presentaba una variación del 10 % frente al resultado real del ensayo. Por tanto usando un número elevado de elementos de malla tenemos un error mayor frente al real, debido a la acumulación de error de tantos cálculos y los puntos divergentes y un tiempo mayor de cálculo en la simulación.

Vemos a continuación la variación de la recuperación. En el caso estándar se obtuvo un valor de la recuperación de 3,67%. En la simulación con 2000 elementos la subida del punzón se ha realizado cuando se obtuvo un valor de ángulo de 87,66° y después de la subida del macho resultó un valor angular de 90,79°, resultado cercano a los 90° buscados. Con estos datos se obtiene un valor de la recuperación de 3,56% que se encuentra dentro de los límites de recuperación de los aceros inoxidable austeníticos. En un principio se sabía que la recuperación no se iba a ver afectada por el hecho de cambiar el número de elementos de malla ya que no influye sobre el mismo.

Otro factor a tener en cuenta en la elección del número de elementos es el tiempo que tarda el programa en realizar todo el cálculo matemático. En realizar el descenso y ascenso del macho en el caso de 2000 elementos supuso un tiempo estimado de 420 min, mientras que la bajada y subida del macho en el caso estándar supuso un tiempo aproximado de 60 min. Cabe decir, por tanto, que se desestima la utilización de un número elevado de elementos ya que el resultado no difiere del caso estándar de forma excesiva, pero si aumenta de forma cuantiosa el tiempo de cálculo.

3.2. Sensibilidad del modelo al Módulo de elasticidad o Módulo de Young

La sensibilidad del modelo al módulo de elasticidad o módulo de Young se ha realizado con coeficiente de rozamiento constante de valor $\mu = 0,2$.

El programa de elementos finitos permite modificar el módulo de Young dentro de la caracterización del material usado en la chapa a plegar y así poder ver cómo varía la fuerza de plegado y la recuperación. Para ello vamos a variar el módulo de elasticidad un 10% en los dos sentidos, es decir aumentaremos el módulo de elasticidad un 10% y lo disminuirémos en una misma proporción.

Al aumentar el módulo de elasticidad, hacemos que la pendiente de la zona elástica de la curva tensión-deformación sea más acusada, por tanto, para una misma deformación tenemos un valor mayor de la tensión. Con un mayor módulo de elasticidad el material es más rígido y se deforma menos.

Partiendo que el caso estándar se hizo con un valor de $E=200$ GPa, se simularon dos casos con los valores $E=180$ GPa y $E=220$ GPa. El resto de parámetros de las simulaciones permanecieron invariables con respecto al caso estándar. Se realizaron los siguientes casos:

SS4_3_50_4_8e32_MA_E180

SS4_3_50_4_8e32_MA_E220

Mostramos a continuación las gráficas obtenidas para el primer caso ($E=180$ GPa) mediante el programa de elementos finitos así como las gráficas obtenidas de extraer los datos de los steps y habiendo interpolado puntos de divergencia.

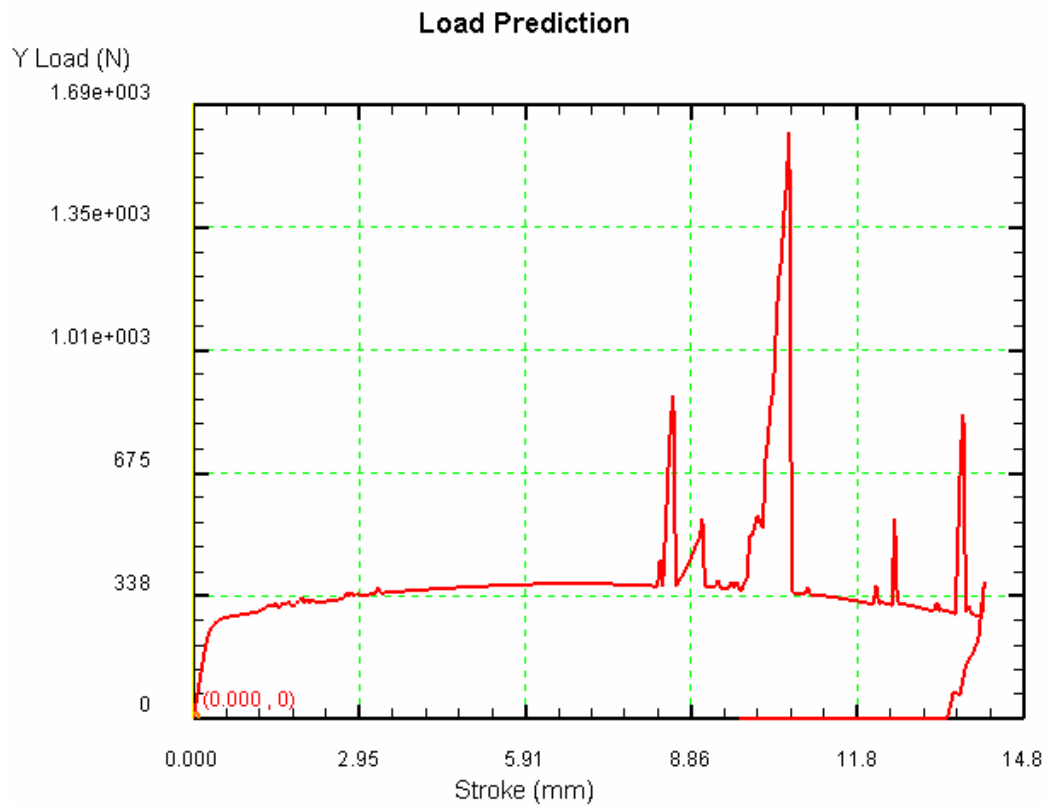


Figura 3.6: Curva Carga-Desplazamiento para $E=180$ GPa

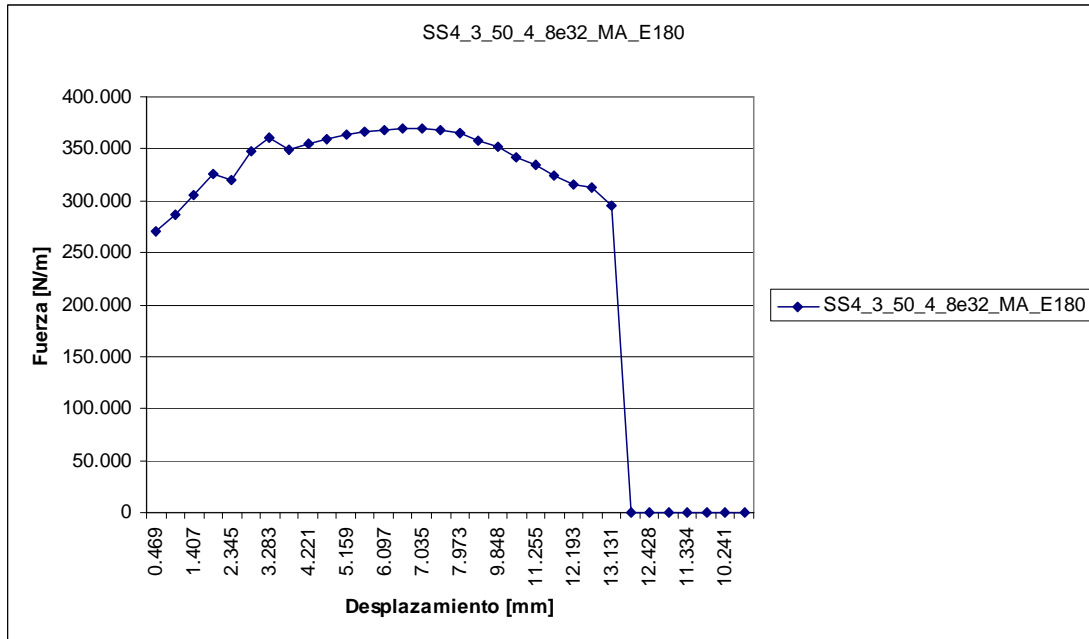


Figura 3.7: Curva interpolada Carga-Desplazamiento para $E=180\text{GPa}$

Se han interpolado los puntos divergentes que aparecen en la figura 3.6, aún así estos puntos no son de vital importancia ya que están fuera de la zona donde se da la fuerza máxima en el plegado. Quitar estas divergencias tan grandes, hace que las divergencias que aparecen en la zona inicial sean más acusadas. Tenemos en cuenta que estos puntos que ocurren para un intervalo de desplazamiento de $[2,345 ; 3,283]$ no son considerados para el análisis de la fuerza máxima a la hora de la comparación con el caso estándar y con el caso $E=220\text{GPa}$.

A la hora del cálculo de la recuperación elástica o springback, el ascenso del macho se realizó cuando se obtuvo un ángulo de $87,77^\circ$ en el step 300. Después del ascenso del punzón se obtuvo un ángulo final de $91,27^\circ$. Por tanto, se obtuvo una recuperación del 4,11%.

Para el caso con $E=220\text{GPa}$, es decir un aumento del módulo de elasticidad del caso estándar de un 10%, se han obtenido las gráficas que siguen a continuación.

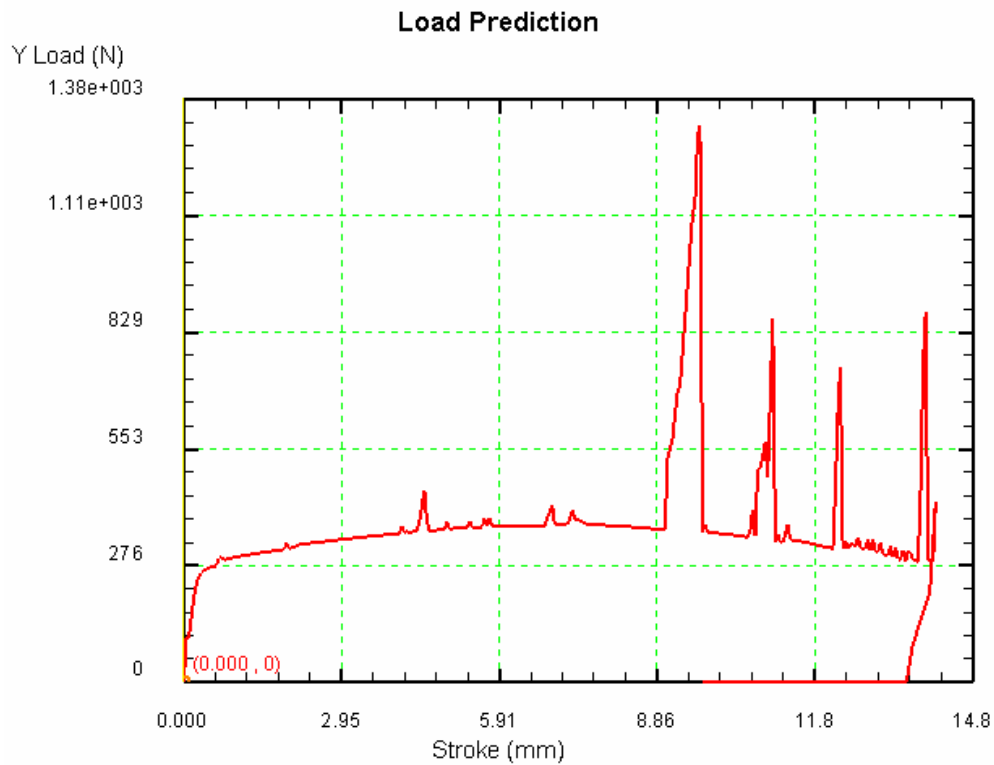


Figura 3.8: Curva Carga-Desplazamiento para $E=220\text{GPa}$

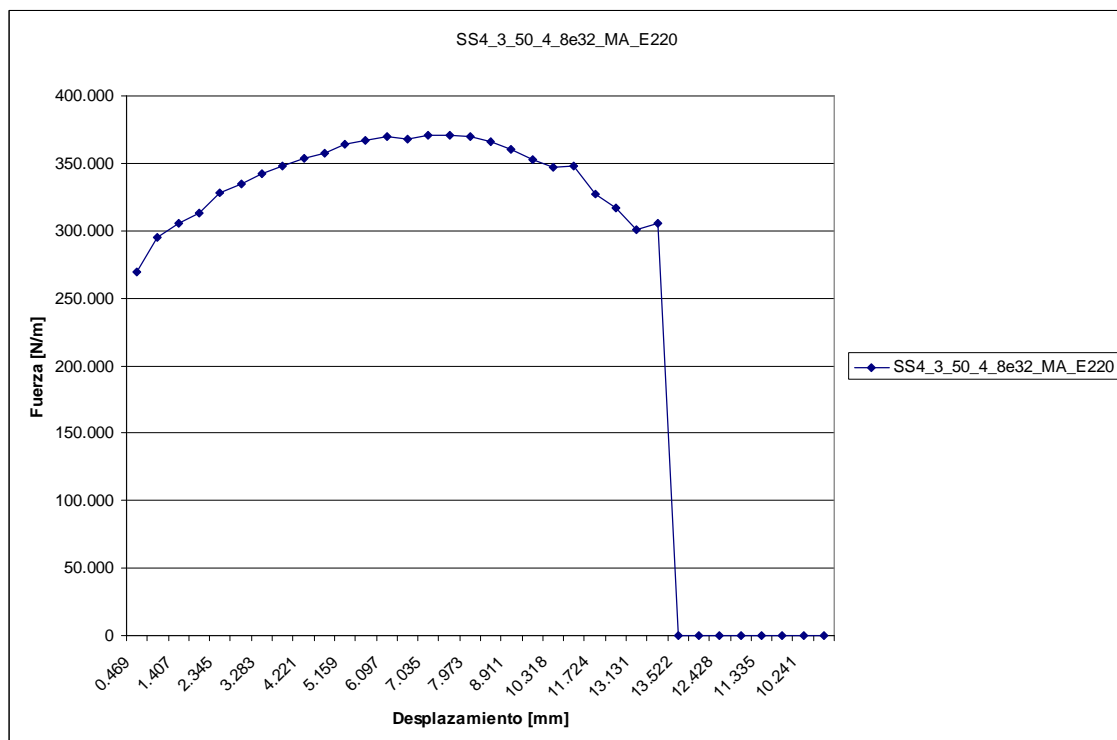


Figura 3.9: Curva interpolada Carga-Desplazamiento para $E=220\text{GPa}$

En este caso se obtuvo un valor cercano a los 87° en el step 300, teniendo un ángulo de $87,94^\circ$. Una vez subido el macho, se obtuvo un ángulo final de valor $90,84^\circ$, cercano a los 90° buscados. Obteniéndose un valor de recuperación de 3,29%.

Realizamos una comparación entre los casos propuestos, es decir, el caso estándar $E=200\text{GPa}$ y las variaciones porcentuales de un 10%. Para ello se hará una comparación en la zona donde se encuentra la fuerza máxima de plegado.

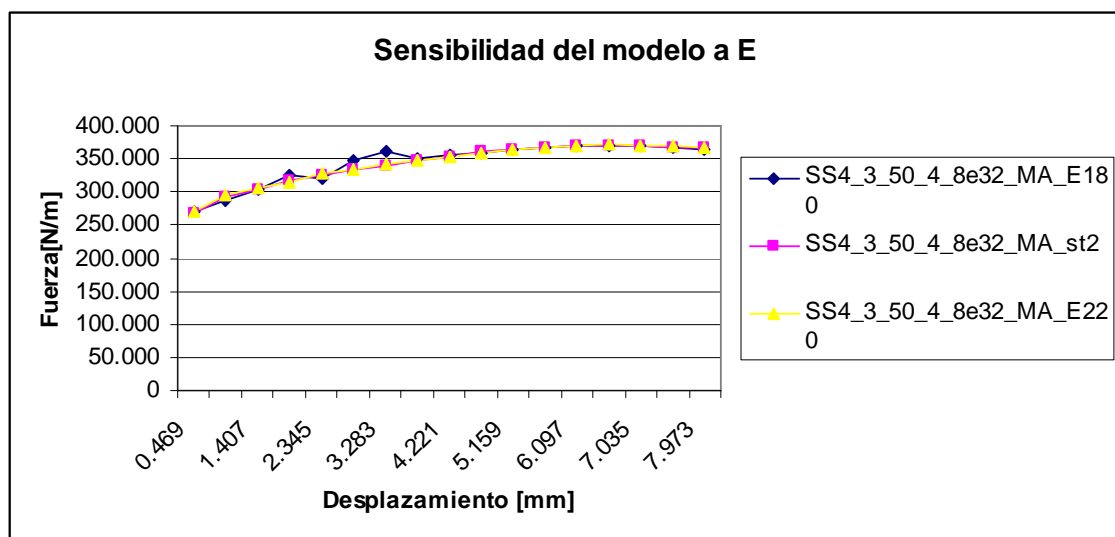


Figura 3.10: Sensibilidad del modelo al módulo de elasticidad o módulo de Young

Como ya se ha explicado anteriormente, los valores que sobresalen de la serie de $E=180\text{GPa}$ no se tienen en cuenta por ser divergentes y hacen que la curva no sea suave, como debería ser. Como se puede observar en la figura 3.9 no se aprecia diferencia significativa entre las curvas. Por tanto la variación del módulo de Young no afecta en la fuerza máxima de plegado. Veamos a continuación los valores obtenidos de fuerzas máximas y su diferencia porcentual.

Parámetros geométricos	E=180	Estándar	E=220
Longitud	50	50	50
Espesor	4	4	4
Abertura	32	32	32
Radio punta	3	3	3
Desplazamiento (mm)	FUERZAS (N/m)	FUERZAS (N/m)	FUERZAS (N/m)
0,469	270.469	266.580	269.797
0,938	286.990	292.657	294.765
1,407	304.750	302.483	305.072
1,876	325.790	317.489	313.394
2,345	320.694	325.074	327.701
2,814	347.797	332.788	335.039
3,283	360.994	339.648	341.847
3,752	349.272	346.912	347.922
4,221	354.540	354.176	353.793
4,690	359.109	360.118	357.604
5,159	362.999	364.387	363.745
5,628	366.080	367.402	366.864
6,097	368.282	369.377	369.983
6,566	369.438	370.263	371.132
7,035	369.401	369.928	370.549
7,504	368.069	366.287	369.967
7,973	365.318	366.504	368.182

Tabla 3.2: Valores de Fuerza máxima al variar el módulo de elasticidad

Como se aprecia en la tabla 3.2, no existen variaciones significativas en el valor de la fuerza máxima.

Se ha **disminuido un 10%** el valor del módulo de elasticidad con respecto al caso estándar, pasando de 200 GPa iniciales a 180GPa. La fuerza ha **disminuido 0,22%**. Mientras que la recuperación ha aumentado.

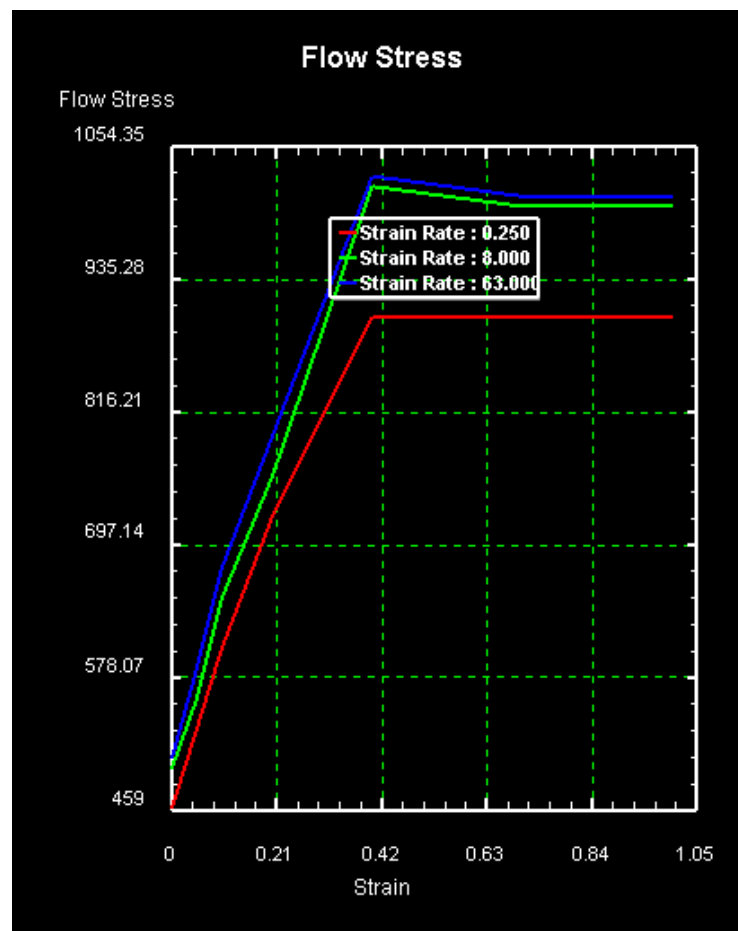
Se ha **aumentado un 10%** el valor del módulo de elasticidad con respecto al caso estándar, pasando de 200GPa iniciales a 220GPa. La fuerza ha **aumentado 0,23%**. Mientras que la recuperación ha disminuido.

3.3. Sensibilidad del modelo a σ - ϵ

Para el estudio de este apartado se realizará una simulación disminuyendo la resistencia del material (con lo que se cambiará el límite de tensión a rotura). Esto es debido a que nuestro material (biblioteca DEFORM) tiene una caracterización más exhaustiva que el lote del material usado en los ensayos reales.

Vemos la posible variación en los resultados de Fuerza y Recuperación a través de la modificación de la relación σ - ϵ de las curvas de caracterización del material. Recordemos que tenemos tres curvas tensión-deformación para tres velocidades de deformación distintas. Manteniendo constante la deformación ϵ , vamos a disminuir un 10% la tensión σ con lo que conseguiremos disminuir la resistencia del material.

En las figuras siguientes vemos las curvas de velocidad para el caso estándar y para nuestro caso, llamado SS4_3_50_4_8e32_MA_TD09.



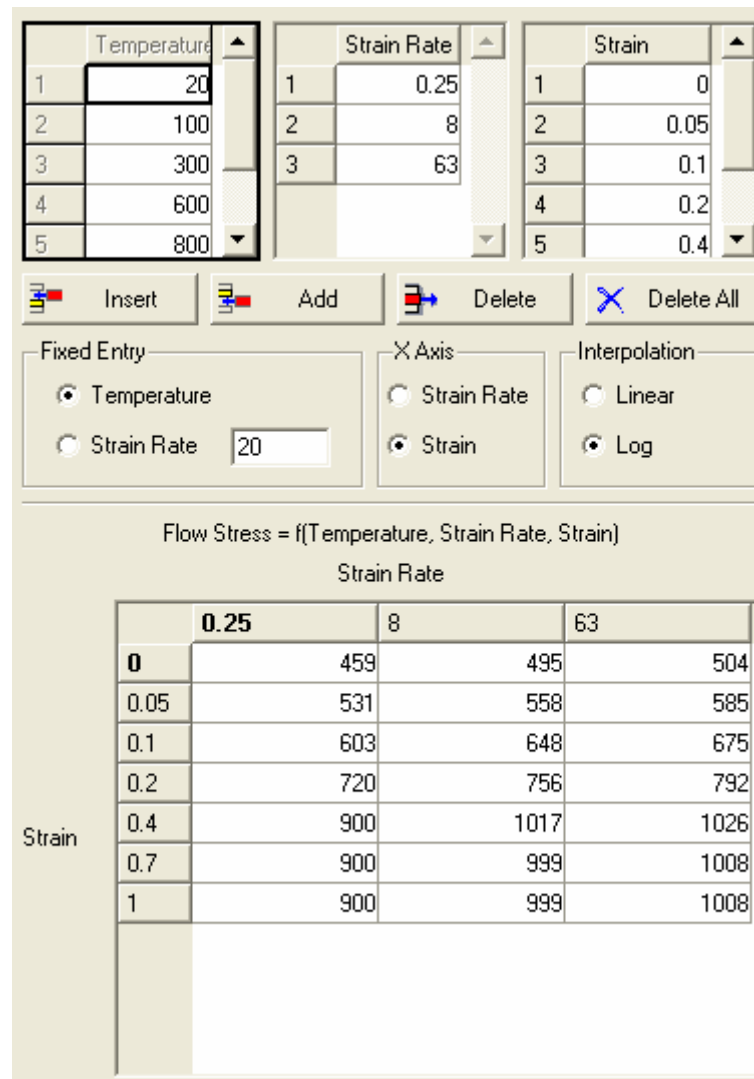


Figura 3.11: Curvas material con una disminución del 10% en tensión

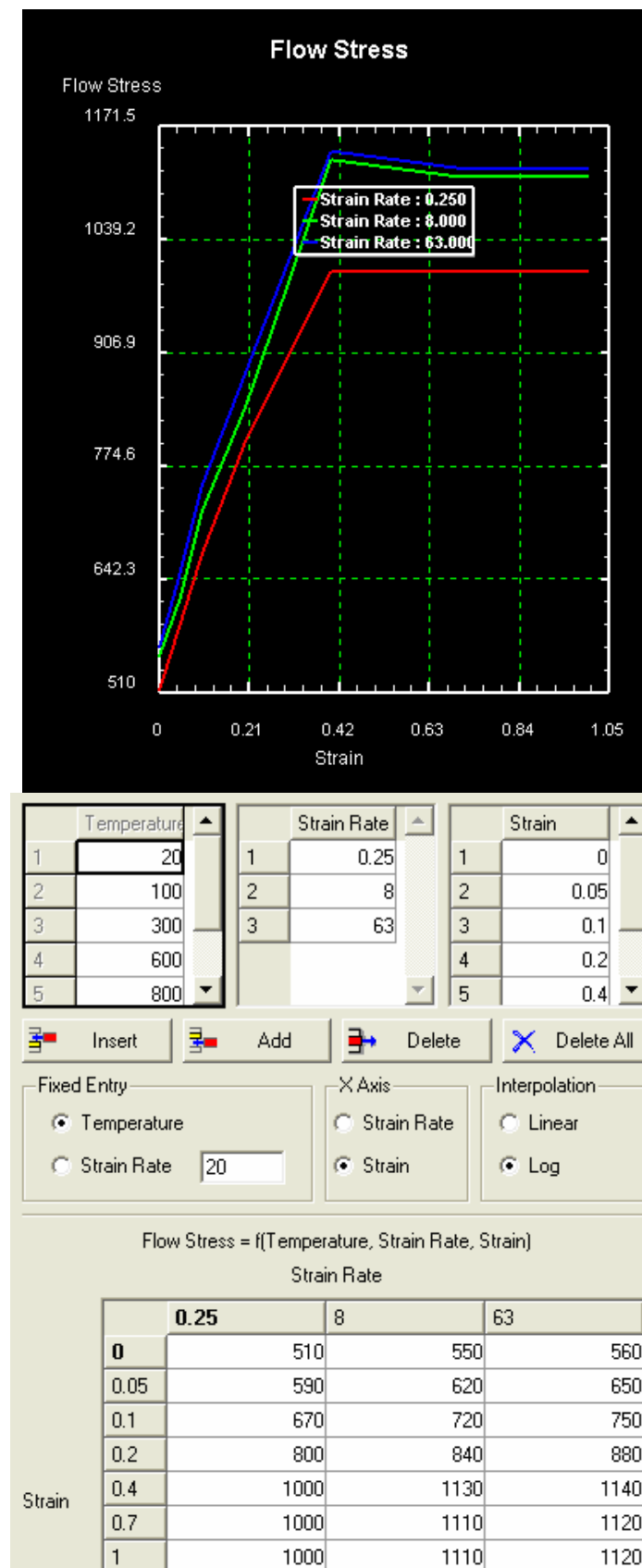


Figura 3.12: Curvas Material estándar

Como se puede comprobar viendo las figuras anteriores, las gráficas son iguales pero escaladas en el eje de ordenadas.

Una vez realizada la simulación con la variación de las curvas del material, se obtuvo la siguiente gráfica fuerza-desplazamiento:

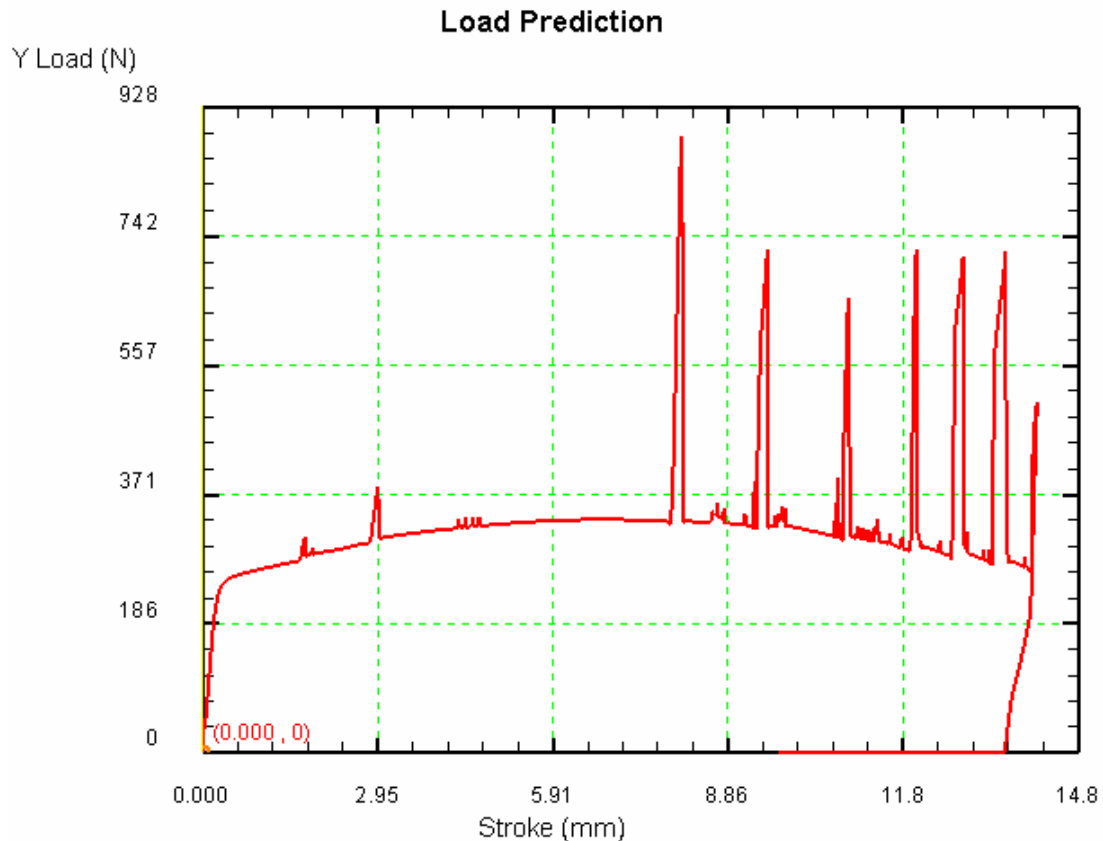


Figura 3.13: Curva Carga-Desplazamiento variando σ 10%

Vemos en la gráfica varios puntos divergentes al principio y sobre todo al final de la misma. Estas divergencias se producen fuera de la zona de fuerza máxima, por tanto no se van a interpolar. Pasando los datos a formato .xls obtenemos una curva continua en su mayor parte:

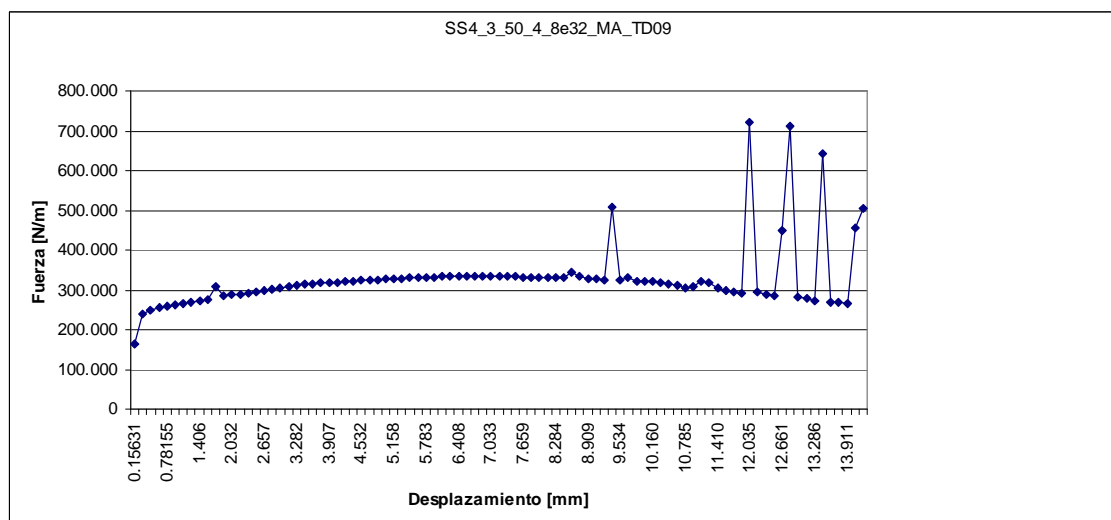


Figura 3.14: Curva Fuerza-Desplazamiento .xls

Analizando los resultados de los steps obtenemos los siguientes datos:

Parámetros geométricos	SS4_3_50_4_8e32_MA_TD09	SS4_3_50_4_8e32_MA_std2
Longitud	50	50
Espesor	4	4
Abertura	32	32
Radio punta	5	3
Desplazamiento (mm)	FUERZAS (N/m)	FUERZAS (N/m)
0,469	250.068	266.580
0,938	262.136	292.657
1,407	271.124	302.483
1,876	284.962	317.489
2,345	292.429	325.074
2,814	301.442	332.788
3,283	311.349	339.648
3,752	316.545	346.912
4,221	321.051	354.176
4,690	325.168	360.118
5,159	328.422	364.387
5,628	331.130	367.402
6,097	333.014	369.377
6,566	333.951	370.263
7,035	333.823	369.928
7,504	333.003	366.287
7,973	331.437	366.504

Tabla 3.3: Valores de Fuerza máxima al variar la resistencia del material



Como se puede apreciar en la tabla anterior, se ha producido una disminución de la fuerza pasando de un valor de 370,263 KN/m estándar a 333,951 KN/m. Esto supone una variación del 9,8%. Esta variación es mayor que en otros casos estudiados en este proyecto y por tanto considerado para hacer la optimización del modelo mediante el ajuste de parámetros del modelo de análisis finitos.

El ascenso del macho para el cálculo de la recuperación se realizó en el step 300 del descenso del macho obteniéndose un valor de 88,078°. Una vez realizado el ascenso del punzón se obtuvo un valor angular de 90,881°. Por tanto la recuperación obtenida es de un 3,18%. Valor dentro del margen la los aceros inoxidable austeníticos. Por tanto, los cambios realizados en el caso estándar para el estudio de este caso no influyen en la recuperación del material de forma notable.

3.4. Sensibilidad del modelo al coeficiente de rozamiento μ

Para la realización de la sensibilidad del modelo al coeficiente de rozamiento se ha mantenido constante el módulo de elasticidad, además del resto de parámetros del caso estándar y se ha variado el coeficiente de rozamiento μ un tanto por ciento.

En el caso estándar realizado se tenía un valor del coeficiente de rozamiento de $\mu=0,2$. Este dato se ha variado un 50% obteniéndose un valor de $\mu=0,3$. Se ha usado para realizar la simulación el caso SS4_3_50_4_8e32_MA_mu03.

El coeficiente de rozamiento es un parámetro de elevado interés debido a que la chapa está en contacto permanente con los apoyos y el macho está en contacto con la chapa en la bajada del mismo, que es cuando ocurre la fuerza máxima de plegado.

Por tanto con parámetros del caso estándar, $E=200\text{GPa}$ y un valor del coeficiente de rozamiento de $\mu=0,3$, se ha obtenido la siguiente gráfica:

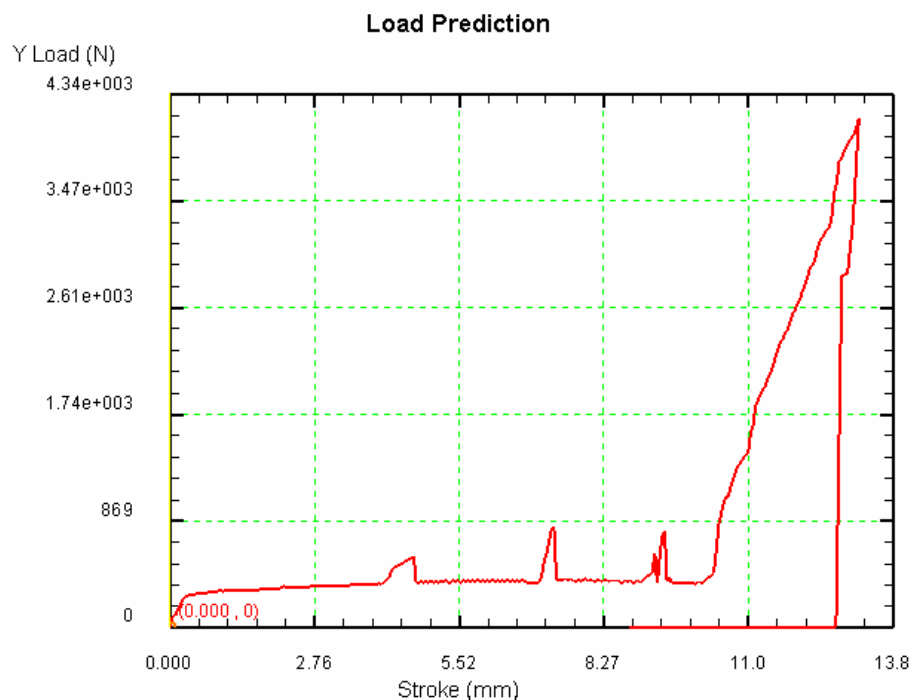


Figura 3.15: Variación del caso estándar con $\mu=0,3$

Como se puede observar, la zona final de la gráfica contiene puntos con valores divergentes. Como ya se sabe, esta zona no es de vital importancia para conocer la fuerza máxima de plegado, por tanto esos puntos no se tendrán en cuenta. Sólo se ha interpolado la zona central de la gráfica obtenida por el programa de elementos finitos DEFORM 2D.

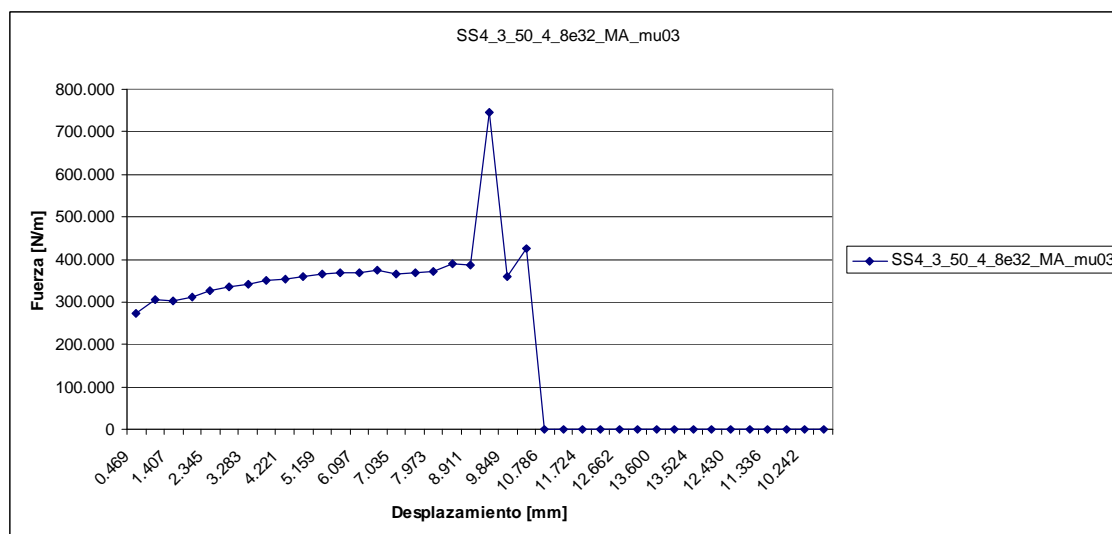


Figura 3.16: Curva fuerza-desplazamiento con $\mu=0,3$

Comparando ambos casos estudiados tenemos que para una variación del **50%** del coeficiente de rozamiento, pasando de un valor estándar $\mu=0,2$ a $\mu=0,3$, se obtiene un **aumento** de la fuerza máxima de plegado del 1,29%, siendo el valor estándar de $F=370,263$ KN/m y valor para un mayor rozamiento de $F=375,076$ KN/m.

La recuperación se realizó cuando se obtuvo un ángulo de $86,7^\circ$. Consiguiendo al final un ángulo en la chapa de $89,86^\circ$. Por tanto, se obtuvo una recuperación del 3,65%. Siendo la recuperación conseguida en el caso estándar de 3,67%, se puede considerar que la variación del coeficiente de rozamiento no influye en el cálculo de la recuperación de la chapa.

A continuación se muestra una tabla comparativa entre los valores obtenidos en el caso estándar de fuerza y desplazamiento del macho junto con los datos obtenidos con la variación de un 50% del rozamiento, $\mu=0,3$.

Al realizar la comparación de este caso con el estándar obtenemos la siguiente tabla:

Parámetros geométricos	SS4_3_50_4_8e32_MA_mu03	SS4_3_50_4_8e32_MA_std2
Longitud	50	50
Espesor	4	4
Abertura	32	32
Radio punta	3	3
Desplazamiento (mm)	FUERZAS (N/m)	FUERZAS (N/m)
0,469	271.787	266.580
0,938	304.635	292.657
1,407	303.019	302.483
1,876	311.411	317.489
2,345	326.139	325.074
2,814	334.737	332.788
3,283	341.933	339.648
3,752	349.069	346.912
4,221	355.006	354.176
4,690	360.944	360.118
5,159	364.407	364.387
5,628	367.871	367.402
6,097	369.666	369.377
6,566	375.076	370.263
7,035	366.844	369.928
7,504	369.160	366.287
7,973	370.777	366.504

Tabla 3.4: Valores de fuerza máxima al variar el coeficiente de rozamiento

3.5. Sensibilidad del modelo al radio de punta

En el siguiente apartado se va a analizar la influencia del radio de punta del macho en la Fuerza máxima de plegado.

En el plegado al aire se pueden conseguir un amplio rango de ángulos de plegado con el mismo punzón dependiendo del recorrido del mismo. Además cuanto menor es el radio de punta del macho, menor será el ángulo que se podrá llegar a conseguir, mientras que si el radio es mayor, se llegará a ángulos mayores.

En nuestro caso, no se va a variar el ángulo final de plegado, fijado en 90° , y se va a analizar la influencia en la fuerza máxima de plegado, al variar de un diámetro de punta de 3mm a un diámetro de punta de 5mm, es decir, una variación del 66,6%. Para ello se ha realizado una simulación con los mismos parámetros que la estándar, variando el radio de punta. En este caso se puede apreciar en el dibujo la diferencia de punzones.

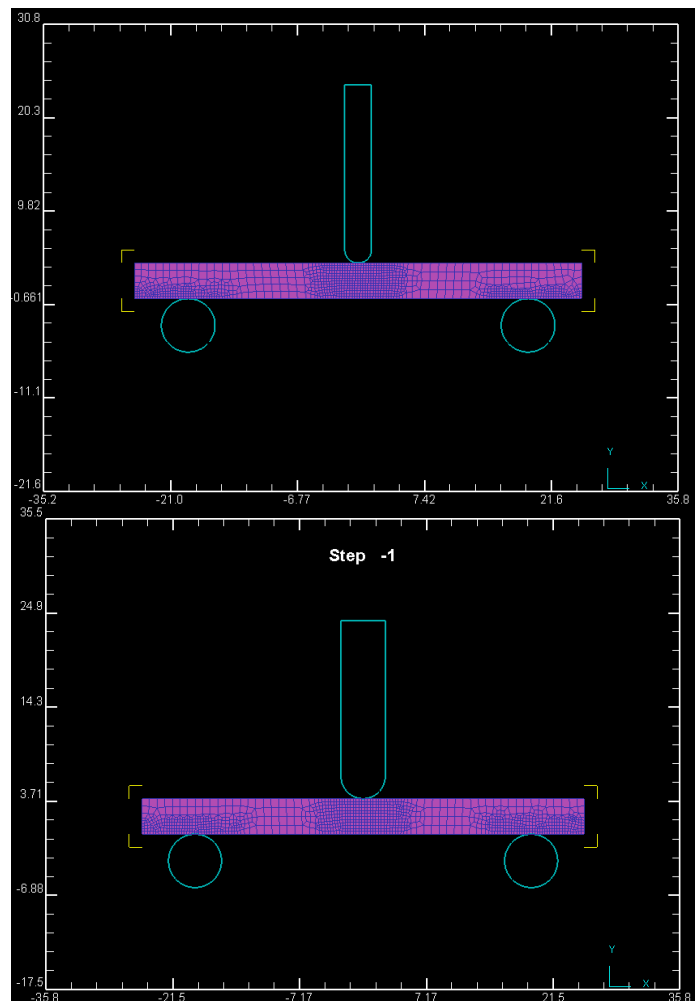


Figura 3.17: Geometría con diámetro de punta de 3mm y de 5mm

Como en los casos anteriores, se ha interpolado algunos puntos divergentes para poder conseguir una mayor suavidad en la curva fuerza-desplazamiento. Como se puede apreciar en la siguiente gráfica, hay puntos que no son necesarios interpolarlos ya que se encuentran fuera de nuestro rango de estudio. Y por tanto se encuentran fuera de la zona de fuerza máxima.

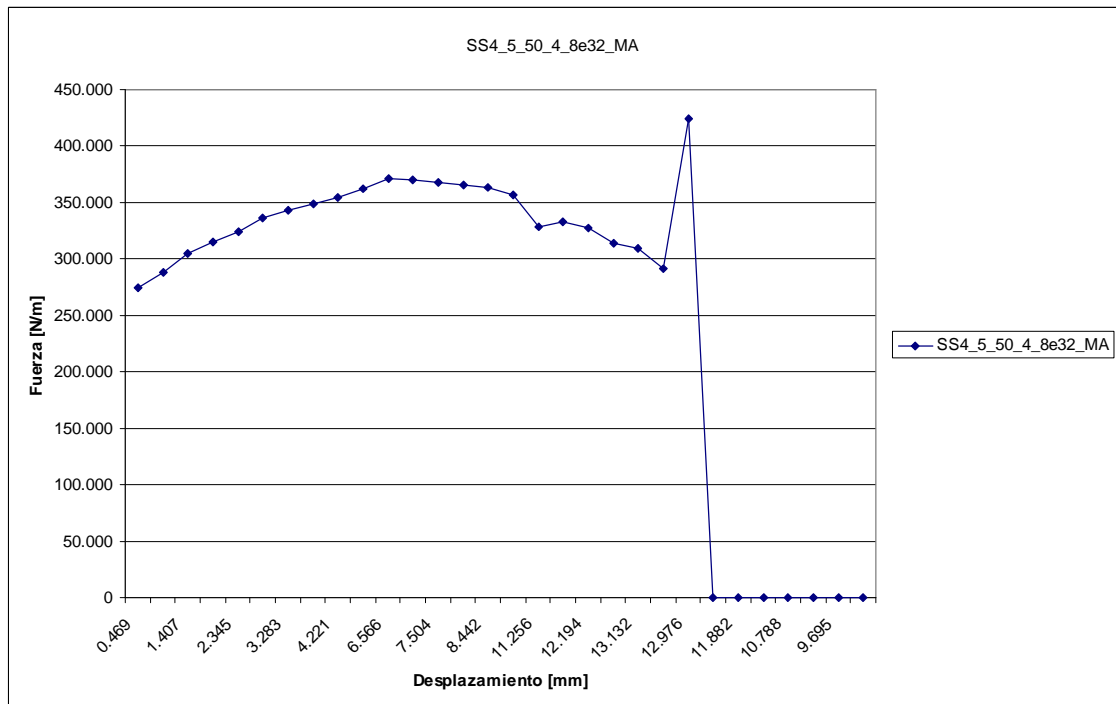


Figura 3.18: Curva fuerza-desplazamiento para un radio de punta de 5mm

Como se ha comentado la zona de mayor recorrido del macho y que está fuera del rango de la fuerza máxima no se han interpolado los puntos divergentes que ha calculado el programa de elementos finitos.

A continuación mostramos una tabla resumen con los datos obtenidos de esta última simulación comparándola con la simulación estándar. En ella se podrá observar que para el ángulo exigido de 90° no se aprecia una gran variación de la fuerza máxima.

Parámetros geométricos	SS4_5_50_4_8e32_MA	SS4_3_50_4_8e32_MA_std2
Longitud	50	50
Espesor	4	4
Abertura	32	32
Radio punta	5	3
Desplazamiento (mm)	FUERZAS (N/m)	FUERZAS (N/m)
0,469	274.023	266.580
0,938	288.457	292.657
1,407	304.795	302.483
1,876	314.958	317.489
2,345	323.661	325.074
2,814	335.916	332.788
3,283	342.681	339.648
3,752	348.662	346.912
4,221	353.970	354.176
4,690	359.687	360.118
5,159	362.467	364.387
5,628	366.473	367.402
6,097	369.232	369.377
6,566	371.487	370.263
7,035	370.461	369.928
7,504	367.947	366.287
7,973	366.103	366.504

Tabla 3.5: Influencia del radio de punta en la fuerza máxima de plegado

Para una variación del radio del macho con respecto del estándar del 66,6% pasando de ser un radio de 3mm a ser un radio de 5mm, se ha llegado a un incremento de la fuerza máxima de 0,33%. Siendo el valor inicial de 370,263 KN/m y el valor final 371,487 KN/m.

La recuperación se realizó en el step 300 con un valor del ángulo de la chapa de 86,20°. Valor un tanto inferior al 87° deseado. Después del ascenso del macho se obtuvo un valor del ángulo de chapa de 89,38° (valor también inferior al 90° deseado ya que la recuperación se realizó a un ángulo inferior). Obtenemos, por tanto un valor de recuperación de 3,69%. Valor muy cercano al obtenido en el caso estándar.

Por tanto, una variación del radio de punta del macho no afecta de forma notable en los resultados de Fuerza y Recuperación. Como consecuencia, este parámetro no será tenido en cuenta para la optimización del modelo por ajuste de parámetros.

3.6. Sensibilidad del modelo al ancho de la chapa

En este apartado se tratará de analizar la influencia del ancho de la chapa en las simulaciones, para saber si este ancho es un factor relevante y a tener en cuenta en el estudio de los distintos casos.

Para ello se ha realizado una nueva simulación con un ancho de chapa de un valor del doble con respecto al caso estándar. Es decir, el caso estándar se hizo con un ancho de la chapa de 50mm y la nueva simulación se hizo con un ancho de chapa de 100mm. No se cambió ningún otro tipo de parámetro.

Hay que tener en cuenta que el ancho de la chapa está ligado a la abertura de la matriz, ya que no sería válido considerar un ancho de chapa cuyos límites estuvieran muy cercanos a la abertura de la matriz ya que al plegar la chapa, ésta se podría quedar sin ningún apoyo.

Se hizo una simulación prueba de lo que pasaría con DEFORM 2D y un ancho excesivamente pequeño, ya que un ensayo real no podría hacerse debido a la caída de la chapa entre la matriz. Como resultado se obtuvo que el programa desplaza la chapa hacia un lado para no perder la condición de contacto entre chapa y apoyo, y para que la chapa no acabara cayéndose, mientras que otro lado de la chapa se despega del apoyo.

Por tanto es importante tener en cuenta que se necesita un ancho mínimo.

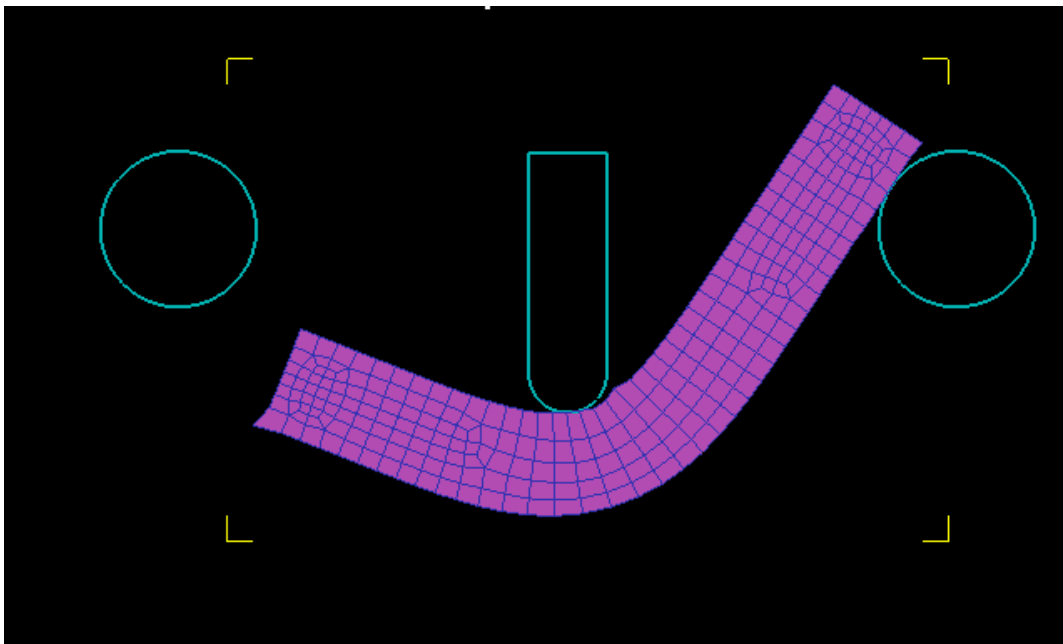


Figura 3.19: Ancho de chapa de menor longitud que ancho de la matriz

El ancho escogido para las simulaciones es suficiente para que no ocurra este efecto. Por tanto vamos a ver si hacer una geometría de chapa con un ancho muy superior influye en los valores de fuerza máxima de plegado. Se ha realizado un caso igual que el estándar pero con un ancho de chapa del 100mm, SS4_3_100_4_8e32_MA_std.

Los datos obtenidos en los dos casos vienen representados en la siguiente tabla:

Parámetros geométricos	SS4_3_100_4_8e32_MA_std	SS4_3_50_4_8e32_MA_std2
Longitud	100	50
Espesor	4	4
Abertura	32	32
Radio punta	3	3
Desplazamiento (mm)	FUERZAS (N/m)	FUERZAS (N/m)
0,469	261.462	266.580
0,938	280.133	292.657
1,407	296.675	302.483
1,876	307.964	317.489
2,345	318.833	325.074
2,814	326.398	332.788
3,283	332.855	339.648
3,752	340.251	346.912
4,221	343.551	354.176
4,690	353.204	360.118
5,159	360.743	364.387
5,628	360.348	367.402
6,097	362.285	369.377
6,566	363.154	370.263
7,035	362.825	369.928
7,504	359.254	366.287
7,973	361.257	366.504

Tabla 3.6: Influencia del ancho de chapa en la fuerza de plegado

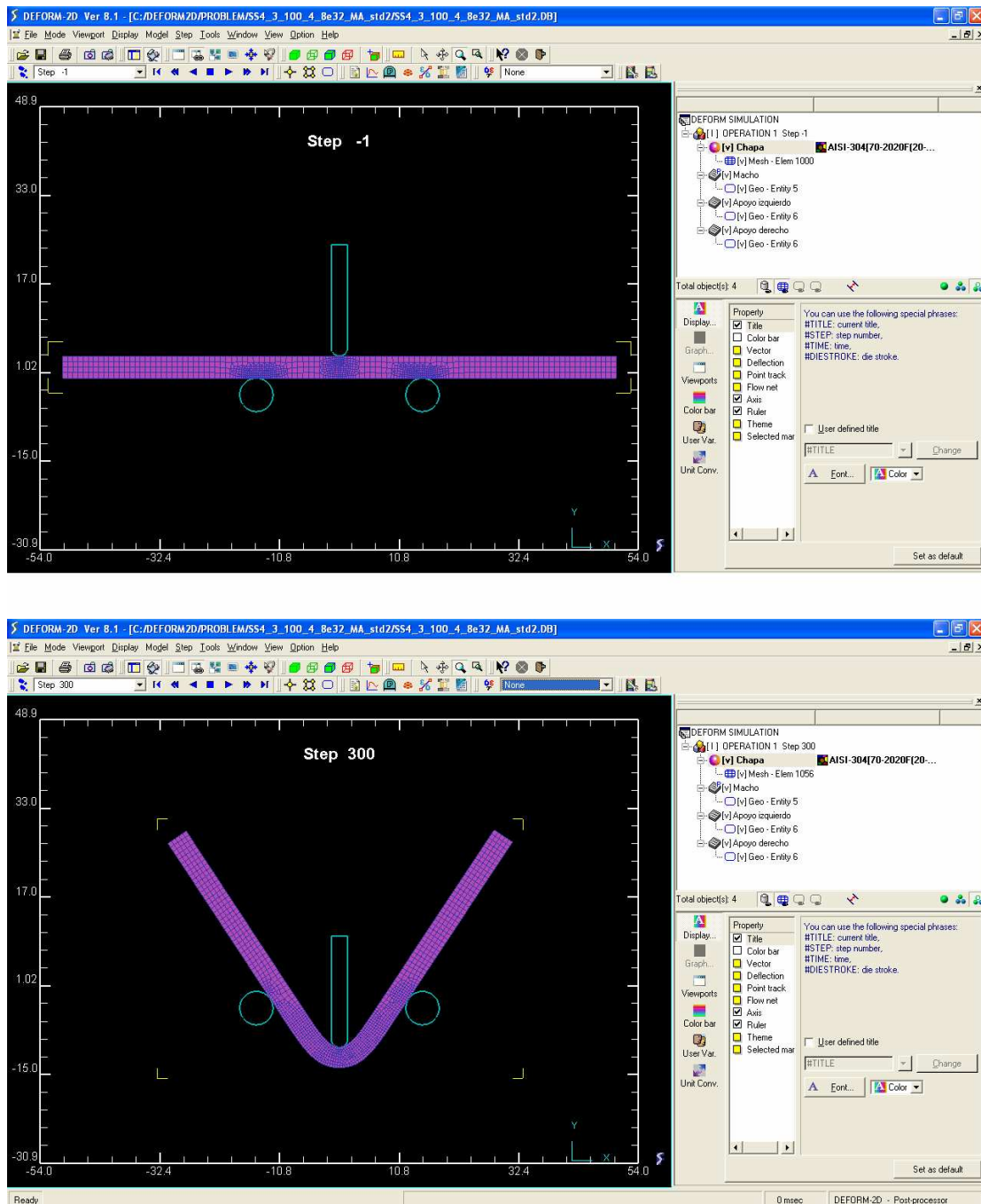


Figura 3.20: Simulación con un ancho de chapa de 100mm

Como se puede ver en la figura 3.20, hay puntos de la chapa (zona de los extremos) en la que su mallado no ha variado. Se podría considerar que el cálculo en esos nodos no es de vital importancia para hallar el valor de la fuerza, ya que no se encuentran en ninguna zona conflictiva del ensayo, como es la zona central.

Representamos a continuación la zona donde se produce la fuerza máxima de plegado.

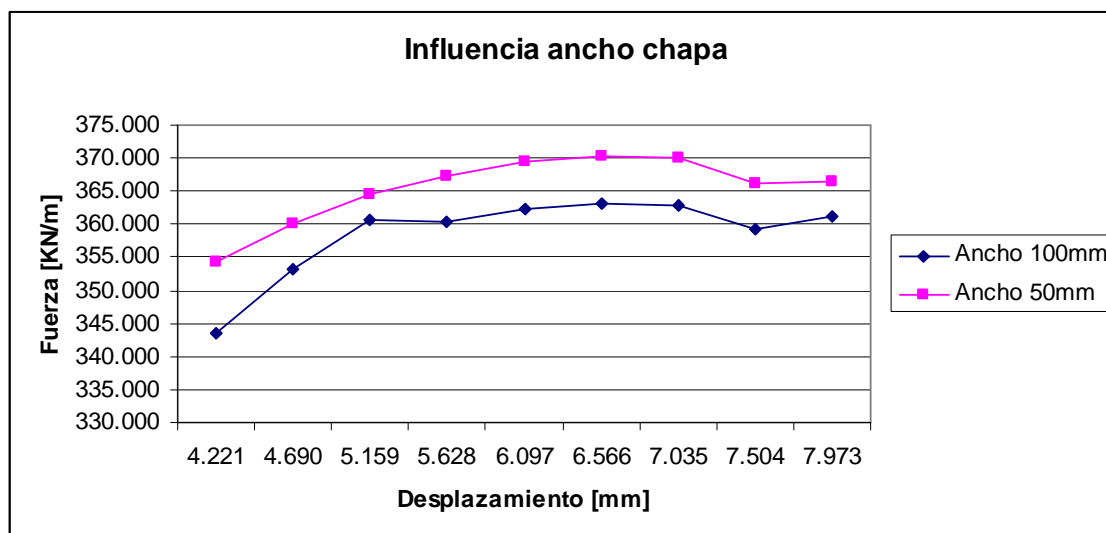


Figura 3.21: Influencia del ancho de la chapa en la fuerza de plegado

Analizando los resultados extraídos, obtenemos que para un aumento del **100%** del ancho de la chapa, pasando de los 50mm iniciales a un valor de 100mm, se produce una disminución del valor de la fuerza del **1,92%**. Esta variación no es significativa y se podría, según la geometría de cada ensayo, disminuir el ancho hasta poder llegar al mínimo posible.

La subida del macho con la chapa de ancho de 100mm se realizó con un ángulo de 86,89° obteniéndose un ángulo final de 89,93°, obteniéndose una recuperación del 3,72%, valor muy cercano al estándar.

Estas variaciones sólo pueden explicarse debido a un tamaño diferente en el mallado ya que ambos modelos tienen el mismo número total de elementos.

Cabe destacar que las circunstancias que hacen que se tenga que plegar con bandas muy estrechas son poco habituales en la industria y por lo tanto no suelen presentarse. En el caso de que esta necesidad fuera real, se puede recurrir a la utilización de matrices con abertura de la V más pequeña de lo habitual. Aunque no debería ser inferior a 6-e porque se incrementa seriamente la fuerza y se disminuye el radio interno de plegado. Esto provoca mayores deformaciones en la superficie externa del plegado pudiendo llegar a la *microfisuración*.

3.7. Sensibilidad del modelo al espesor de la chapa

Analizamos en este apartado la sensibilidad del modelo al espesor de la chapa. Cabe mencionar su estudio y análisis a pesar de no ser usado en la optimización del modelo debido al cambio sustancial de geometría.

Para realizar la simulación se ha aumentado en un 10% el espesor de la chapa estándar, fijado en 4mm, obteniéndose un espesor de 4,4mm. El resto de parámetros permanecieron invariables.

Es importante mencionar que la abertura en el plegado es dependiente del espesor mediante una relación lineal. En la realización de este proyecto se fijó dicho valor en $V=8 \cdot e$. En este caso como queremos ver la sensibilidad con respecto al espesor, el valor de la abertura será el mismo que el usado en el caso estándar. Aún así, se realizará otra simulación con un valor de abertura de $V=35,2\text{mm}$ correspondiente al espesor de 4,4mm, para poder ver los valores de fuerza y recuperación cuando se produce una variación pura del espesor para condiciones de abertura idénticas.

Para analizar la sensibilidad el espesor se realizó la simulación SS4_3_50_44_8e32_MA, correspondiéndose los dígitos _44_ al espesor de 4,4mm. Una vez realizada la simulación se obtuvo el siguiente gráfico de fuerzas:

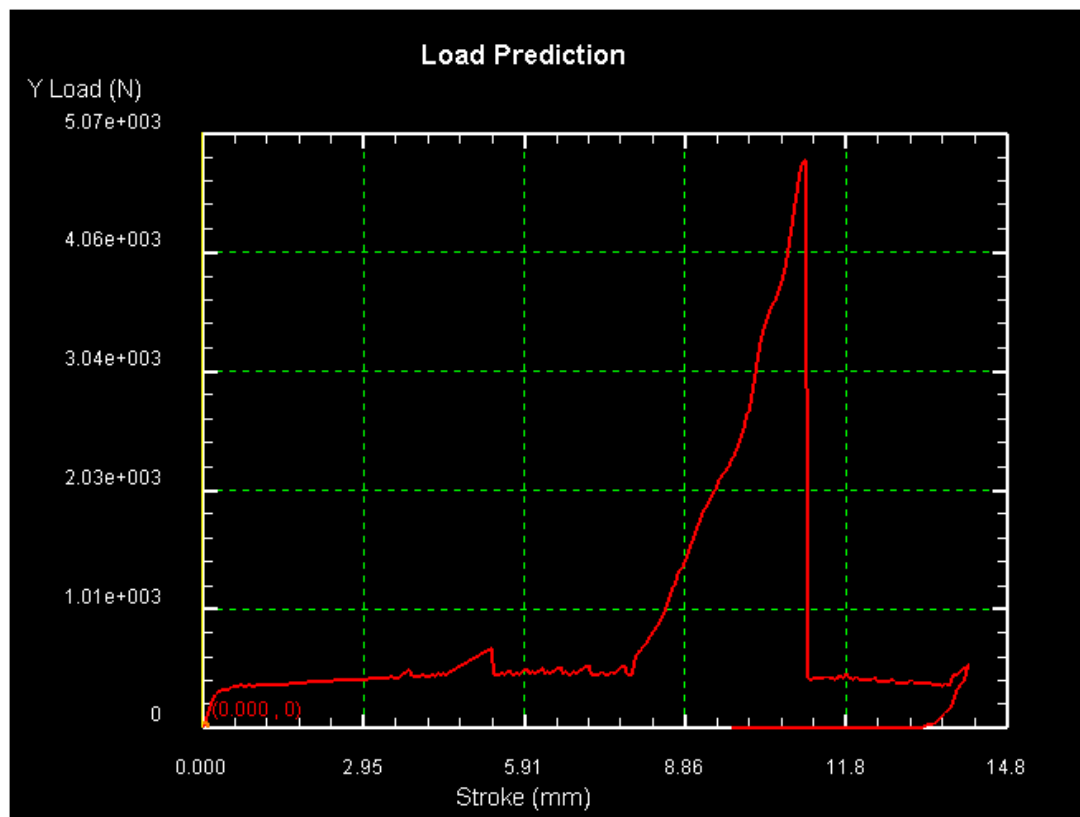


Figura 3.22: Gráfico de fuerzas con espesor de chapa de 4,4mm y abertura 32mm

Se puede apreciar claramente varios puntos de divergencia fuera del entorno donde se produce la fuerza máxima de plegado. Una vez exportados los valores a un archivo tipo .xls, analizados e interpolados en caso necesario se obtuvo un valor de **fuerza máxima de 519,203KN/m** en el mismo punto de recorrido del macho que en el caso estándar.

La recuperación se obtuvo a partir de los valores angulares 87,6° y 88,79°, obtenidos en el descenso y ascenso del macho respectivamente. Con estos datos se obtuvo una **recuperación de 1,357%**. Este valor está fuera de los márgenes normales de variación para este tipo de material.

Se ha obtenido, por tanto, un **aumento de la fuerza máxima del 40,22%** y una **disminución de la recuperación del 63,02%**. Esto es debido a la abertura, ya que para el valor de espesor usado se ha utilizado una abertura menor tamaño.

Seguidamente analizaremos los valores de fuerza y recuperación cuando se produce una variación pura del espesor para **condiciones de abertura idénticas**. En nuestro caso nuestra condición para la abertura es la relación lineal $V=8 \cdot e$. Por tanto obtenemos dos aberturas distintas, $V=32\text{mm}$ para el caso estándar de espesor 4mm y $V=35,2$ para el caso de 4,4mm de espesor.

Para este último caso se ha realizado la simulación SS4_3_50_44_8e352_MA, en el que los dígitos _44_ corresponden al espesor 4,4mm y los dígitos _8e352_ corresponden al valor de la abertura $V=8 \cdot e=8 \cdot 4,4=35,2\text{mm}$.

Una vez obtenidos los datos de la simulación se procede a su estudio obteniéndose la gráfica siguiente:

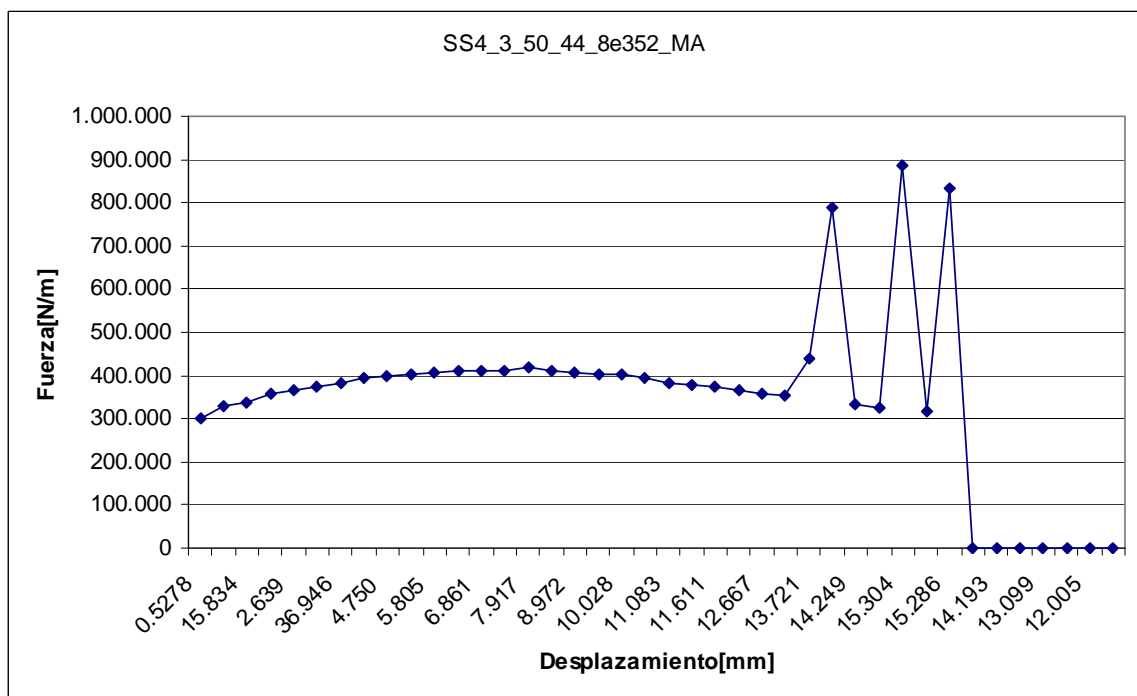


Figura 3.23: Gráfico de fuerzas con espesor de chapa 4,4mm y abertura 35,2mm



Como se aprecia, se obtuvo una curva continua salvo los puntos de divergencia para valores elevados de desplazamiento del macho. Analizados los datos se obtuvo un valor de **fuerza máxima de 417,151KN/m**, esta fuerza se dio en un valor mayor de desplazamiento del macho con respecto al caso estándar.

La recuperación se obtuvo a partir de los valores angulares 87,91° y 89,5°, obtenidos en el descenso y ascenso del macho respectivamente. Con estos datos se obtuvo una **recuperación de 1,81%**. Este valor está fuera de los márgenes normales de variación para este tipo de material.

Por tanto, la variación de la fuerza y recuperación en el caso de variación *pura del espesor para condiciones de abertura idénticas* es la que sigue: Un **aumento de la fuerza de 12,66%** con respecto a la estándar y una **disminución de la recuperación en un 50,68%** con respecto al valor estándar.



3.8. Análisis de resultados

Analizaremos los resultados obtenidos de la sensibilidad del modelo a los distintos parámetros modificados. Para ello se realizará un resumen de los resultados de fuerza y recuperación obtenidos en este apartado.

- Sensibilidad del modelo al tamaño de los elementos
- Sensibilidad del modelo al Módulo de Young
- Sensibilidad del modelo a σ - ϵ
- Sensibilidad del modelo al coeficiente de rozamiento
- Sensibilidad del modelo al radio de punta
- Sensibilidad del modelo al ancho de la chapa
- Sensibilidad del modelo al espesor de la chapa

Sensibilidad del modelo al tamaño de los elementos

El número de elementos se **aumentó un 100%** pasando de 1000 elementos a 2000 elementos. Al hacer esta variación tenemos que:

La Fuerza máxima ha aumentado pasando de los 370,263 KN/m iniciales a 387,103 KN/m finales. La **variación de la fuerza máxima** de plegado es de **4,55%**. No es una diferencia excesiva ya que no supera el 10%.

Se obtiene un valor de la recuperación de 3,56% que se encuentra dentro de los límites de recuperación de los aceros inoxidables austeníticos. Siendo el valor estándar obtenido de 3,67%, obtenemos una **disminución de la recuperación** con respecto a la estándar de **2,99%**.

No se obtienen valores en un primer momento despreciables, pero finalmente se opta por no tenerlo en cuenta en la optimización del modelo debido al **excesivo tiempo** necesario para el **cálculo matemático**. Por tanto en este caso el tiempo se convierte en el factor más importante.



Sensibilidad del modelo al Módulo de Young

Disminuyendo un 10% el valor del módulo de elasticidad con respecto al caso estándar, pasando de 200GPa iniciales a 180GPa. **La fuerza ha disminuido 0,22%**, por lo que no se ve afectada por la variación de E. Tenemos un valor de recuperación del 4,11%, lo que se transforma en un **aumento de recuperación** con respecto al valor estándar (3,67%) del **11,9%**.

Se ha **aumentado un 10%** el valor del módulo de elasticidad con respecto al caso estándar, pasando de 200GPa iniciales a 220GPa. **La fuerza ha aumentado 0,23%**, por lo que no se ve afectada por la variación del módulo de Young. Se obtuvo un valor de **recuperación** de 3,29%, por tanto se ha conseguido una **disminución del 10,35%**.

Por tanto, la **variación del módulo de Young**, es decir, variación en la rigidez del material, **afecta de forma importante a la recuperación del mismo pero no afecta de manera considerable en el valor de la fuerza máxima**.

Sensibilidad del modelo a σ - ϵ

Se ha **disminuido** en un 10% el valor de tensión en las curvas de caracterización del material de la biblioteca de DEFORM, disminuyendo así la resistencia del material.

Se obtuvo un valor de **fuerza máxima** de 333,951 KN/m, lo que supone una **disminución** con respecto al valor estándar de un **9,8%**.

Con respecto a la recuperación, se obtuvo un valor de 3,18%, por tanto tenemos una **disminución del valor de recuperación del 13,35 %**.

Por tanto en este caso **tanto la fuerza como la recuperación se ven afectadas** debido a la variación de la resistencia del material.

Sensibilidad del modelo al coeficiente de rozamiento

Se ha **aumentado** en un 50% el valor del coeficiente de rozamiento, pasando de un valor inicial de 0,2 a un valor de 0,3.

En este caso un aumento del coeficiente de rozamiento implicó un **aumento de la fuerza máxima de un valor porcentual de 1,29%**, pasando de un valor inicial de 370,263KN/m a un valor final de 375,076KN/m.



La recuperación no se ve afectada por este hecho, como confirman los resultados. Se obtuvo una **recuperación** de valor 3,65% que supone una **variación** porcentual con respecto al valor estándar de **0,54%**. Por tanto, un aumento de **coeficiente de rozamiento** **no influye en términos de recuperación**.

Sensibilidad del modelo al radio de punta

En este apartado se **aumentó** el radio del macho en un 66,6% pasando de un macho con diámetro inicial de 3mm a un macho con un diámetro final de 5mm. Como vamos a mostrar en los resultados siguientes, la fuerza y la recuperación no se ven afectadas por este aumento de la punta del punzón de forma notable. Para ángulos finales muy pequeños, el valor del radio de punta si es un factor a tener en cuenta. Cuanto más pequeño sea el radio, podremos conseguir ángulos más agudos.

La **fuerza máxima** obtenida fue 371,487 KN/m, lo que supone un **aumento con respecto al caso estándar de 0,33%**.

La **recuperación** obtenida fue 3,69%, que se transforma en un **aumento de 0,544% con respecto al caso estándar**.

Sensibilidad del modelo al ancho de la chapa

Se ha **aumentado** en un 100% el ancho de la chapa pasando de un valor inicial de 50mm a un valor final de 100mm, sin variar el número ni el tamaño de los elementos que conforman la malla. Tanto la fuerza como la recuperación no han sufrido grandes cambios, con lo que podemos decir que para una variación porcentual tan elevada del ancho de la chapa, ni la fuerza ni la recuperación son afectadas.

La **fuerza máxima** obtenida tiene un valor de 363,154KN/m. La variación con respecto al caso estándar es una **disminución en un 1,92%**.

La **recuperación** obtenida es 3,72%, y se corresponde con un **aumento** con respecto al caso estándar de **1,36%**.



Sensibilidad del modelo al espesor de la chapa

Se ha **aumentado** el espesor en un 10% pasando de 4mm como valor inicial estándar a 4,4mm. El resto de los parámetros se han mantenido constantes, incluso la abertura para poder ver la sensibilidad al espesor.

Como sabemos la abertura se rige por una relación lineal. Dentro de ellas se ha escogido $V=8 \cdot e$ como valor prefijado. Como se ha usado una abertura menor que la que correspondía a su valor de espesor (4,4mm) se ha obtenido una fuerza máxima mucho mayor que en el caso estándar. La recuperación ha sufrido una disminución debida también a ese valor inferior de abertura.

Se obtuvo un valor de **fuerza máxima de 519,203KN/m**, lo que supone un **aumento de la fuerza máxima del 40,22%**.

La recuperación se obtuvo a partir de los valores angulares 87,6° y 88,79°, obtenidos en el descenso y ascenso del macho respectivamente. Con estos datos se obtuvo una **recuperación de 1,357%**, que corresponde a una **disminución de la recuperación del 63,02%**.

4. Optimización del modelo

En este apartado se va a tratar de hacer la optimización del modelo de elementos finitos por ajuste de parámetros. Es decir, una vez que se sabe cómo influyen las variables en nuestro caso estándar, se va a proceder a ajustar esos valores para poder acercarnos lo más posible al caso real ensayado. De esta forma se podrá llegar a un resultado más cercano al deseado.

4.1. Optimización del modelo

La optimización se realizará mediante ajuste de parámetros. Estos parámetros son:

- Coeficiente de rozamiento μ
- Módulo de elasticidad E
- Relación de resistencia σ/ϵ

El resto de parámetros que han sido estudiados no se ven implicados en la optimización, esto es debido a que ni el ancho de la chapa ni el radio del macho modifican de forma notable la fuerza y la recuperación, así como el número de elementos que sólo interviene en el estudio numérico.

A modo de resumen, ya que se explicó detalladamente en el anterior capítulo, diremos que la máxima variación de fuerza y recuperación fue debida a la modificación de la relación σ/ϵ , siendo ambas del 10% al variar en un 10% el valor de sigma. El coeficiente de rozamiento no hacía variar de forma considerable la recuperación pero nos variaba la fuerza en un 1,3% al aumentarlo un 50%. El módulo de Young no nos variaba la fuerza pero sí la recuperación en torno a un 10% al variar éste en otro tanto.

La fuerza real obtenida en el ensayo empírico fue de 332KN/m, mientras que en el caso estándar realizado con el programa de elementos finitos fue de 370,263KN/m.

La recuperación para el material usado a los 90° requeridos varía en torno a 2-4%. Recordemos que la recuperación es función de la abertura, espesor, módulo de Young, material y ángulo de plegado. Ni la abertura, ni el espesor, ni el ángulo de plegado son parámetros que cambien y se necesiten en el ajuste de parámetros. El material (a través de la relación σ/ϵ) y el módulo de Young serán usados para ajustar la recuperación al error mínimo.

En un primer momento se realizará un ajuste inicial de la fuerza máxima a través de la relación σ/ϵ , ya que el material usado de la biblioteca de DEFORM puede tener una resistencia distinta al material del ensayo.



Un segundo ajuste de la fuerza vendrá dado por el coeficiente de rozamiento. Hacemos este ajuste en segundo lugar porque la variación de la fuerza es menor que en el caso anterior y apenas apreciable en la recuperación. Además hay que tener en cuenta que el coeficiente de rozamiento no es un parámetro que se pueda ajustar en un amplio rango de valores. Se tomó un valor inicial de 0,2, el valor de este coeficiente puede estar en torno a 0,15 – 0,10. Siendo este último valor para contacto acero-acero de muy buenas calidades con un excelente acabado.

Por último se realizará un ajuste por medio del módulo de Young E. Con este parámetro ajustaremos la recuperación que nos había variado al hacer el ajuste inicial, la fuerza apenas nos varía al variar E.

Inicializaremos la optimización del modelo mediante un *ajuste inicial* de la fuerza máxima. La diferencia porcentual entre la fuerza real del ensayo y la obtenida en el caso estándar es de un aumento de la estándar en un 11,525%. Haremos una disminución inicial de la fuerza mediante la relación σ/ϵ . Esta disminución no puede hacer que la fuerza máxima sea más pequeña que la conseguida en el ensayo real, ya que el ajuste definitivo de la misma la haremos a través del coeficiente de rozamiento y éste sólo puede disminuir, siendo 0,2 el valor estándar, haciendo disminuir la fuerza. Como se ha comentado con anterioridad, el valor del coeficiente de rozamiento debería estar dentro del rango 0,15-0,10 en el contacto acero-acero de buenas calidades con un excelente acabado.

Se usará para el ajuste inicial de la fuerza la bajada del 10% de la relación σ/ϵ utilizada con anterioridad. Con esta variación tenemos un valor de fuerza total de 333,951 KN/m, que se representa en un aumento del 0,5876% de la fuerza con respecto al caso real.

Se realizará un *ajuste más preciso* a través de la variación del coeficiente de rozamiento. El valor usado en el caso estándar es de 0,2 y se disminuirá para el ajuste final de la fuerza. Se va a realizar una simulación disminuyendo el parámetro en un 22%, obteniéndose un valor de μ de 0,156. Una vez realizada la simulación (SS4_3_50_4_8e32_MA_TD09mu0156) con la variación de los parámetros se ha obtenido un valor de fuerza máxima de 333,010KN/m. Como podemos observar el valor de la fuerza máxima a disminuido, pero aún así podemos ajustarnos más al valor de la fuerza del ensayo real ya que el valor del coeficiente de rozamiento estaba un poco por encima del rango especificado 0,15-0,10.

Continuando con el ajuste de la fuerza a través del coeficiente de rozamiento, se va a proceder a disminuirlo por segunda vez. En este caso usaremos un valor de $\mu=0,12$, lo que supone una disminución de un 23,077% con respecto al anterior usado ($\mu=0,156$). Una vez realizada esta segunda simulación (SS4_3_50_4_8e32_MA_TD09_mu012) se obtuvo como fuerza máxima el valor de 332,144KN/m. Lo que supone una variación con respecto a la fuerza real del ensayo del 0,0433%. Este último valor porcentual es muy pequeño, por lo que podemos decir que la fuerza ya está ajustada según los parámetros usados.



Por último falta el *ajuste de la recuperación* que se realizará mediante la variación del módulo de elasticidad. Tenemos también que considerar que al variar E nos va a variar la fuerza de forma mínima, aun así se considerará como valor de fuerza ajustada el valor último de fuerza calculado.

Para la optimización a través del módulo de Young tenemos que partir del valor de recuperación obtenido con el coeficiente de rozamiento $\mu=0,12$. Con este coeficiente, partiendo de un ángulo inicial de $86,8^\circ$ se obtuvo un ángulo final de $90,475^\circ$, lo que se corresponde con una recuperación del 3,197%. Se sabe que la recuperación de los aceros inoxidables AISI304 está dentro del rango del 2-4%. Por tanto, ajustaremos el modelo aumentando de forma mínima la recuperación a través del módulo de Young E . La recuperación medida en el ensayo real fue de 4,1%. Hay que tener en cuenta la dificultad del cálculo de la recuperación en el ensayo debido a la dificultad de medir el ángulo antes del springback. Por tanto se aumentará de forma mínima el valor de recuperación para que esté dentro del margen pero más cerca del valor obtenido experimentalmente.

Para aumentar la recuperación elástica del material tenemos que disminuir el módulo de elasticidad, es decir, tenemos que disminuir la rigidez. Se probará una disminución del 5%, obteniéndose un valor del módulo de 190GPa. Una vez realizada la simulación obtenemos un resultado de fuerza de 332,030KN/m con una recuperación del 3,92%. La fuerza ha disminuido 0,0343% con respecto al valor obtenido del ajuste de la fuerza a través del coeficiente de rozamiento. Debido a los estudios realizados estaba constatado que la fuerza iba a disminuir de forma mínima al disminuir el módulo de elasticidad. Por tanto, el valor obtenido de fuerza mediante el ajuste del módulo de Young supone un aumento del 0,009% con respecto al valor del ensayo real. El error de la recuperación con respecto a la real medida es de 0,18%, el valor obtenido está dentro de los márgenes del material usado por tanto se dará como válido.

Como conclusión al estudio realizado en este apartado cabe decir que el modelo de elementos finitos queda optimizado con el ensayo real con un coeficiente de rozamiento de 0,12 y un módulo de elasticidad de 190GPa con una disminución de la resistencia del material usado en la biblioteca del programa del 10%.

4.2. Comparación de resultados

En este apartado se compararán los resultados de dos formas. Se realizará una comparación de los resultados reales del plegado con los resultados obtenidos del modelo numérico estándar, y se compararán los resultados reales del plegado con los resultados del modelo numérico optimizado.

Por tanto, para una chapa de espesor 4mm, abertura de matriz 32mm (8-e), ancho 50mm y diámetro del macho 3mm se han obtenido los siguientes resultados:

Espesor=4 mm.	Datos Reales (medidos)	Datos Estándar FEM (calculados)	Error
Fuerza [KN/m]	332,000	370,263	11,520%
Recuperación° [%]	4,100	3,670	0,43

Tabla 4.1: Comparación resultados Reales-Estándar

Espesor=4 mm.	Datos Reales (medidos)	Datos Estándar Optimizados FEM (calculados)	Error
Fuerza [KN/m]	332,000	332,030	0.009%
Recuperación° [%]	4,100	3,920	0,18

Tabla 4.2: Comparación resultados Reales-Estándar Optimizados

Como se puede apreciar en las tablas anteriores, tenemos grandes variaciones al comparar el caso estándar sin optimizar y el caso real. La comparación con respecto al caso optimizado se acerca en términos de fuerza al caso real. La recuperación se aleja del valor real, aunque se considera como válido debido a que se encuentra dentro del rango de recuperación de los aceros inoxidables austeníticos y debido a la dificultad del cálculo exacto de este término en el caso experimental.

Se puede deducir en consecuencia que las **características mecánicas del material estudiado son algo más bajas que el material tratado como estándar** en las tablas del programa. Tanto la resistencia como el módulo de elasticidad necesarios para el ajuste del programa, resultan algo inferiores.

Una variación algo mayor del módulo de elasticidad daría incluso un error de valor 0%, aunque se ha preferido mantener el valor de E dentro de un margen de variación, no superior al 5%, dado que es un margen más prudente y en todo caso el error final sigue siendo muy bajo.



5. Conclusiones

Se ha desarrollado y validado un modelo numérico para el cálculo, mediante el método de elementos finitos, de los parámetros asociados al plegado de chapas usando como herramienta informática el software DEFORM 2D. Dicha validación se ha realizado mediante la optimización de los resultados mecánicos del modelo numérico con respecto a los ensayos experimentales. Y siendo estos resultados numéricos cercanos a la realidad una vez optimizados.

El programa informático DEFORM 2D es una herramienta muy amplia en rangos de aplicación y materiales. Es una herramienta que cumple con las condiciones de fiabilidad y simplicidad propias de los programas de uso real. No ha que olvidarse nunca de que los programas de análisis a través de elementos finitos son una aproximación a la realidad, no suelen dar datos exactos. La existencia del error en esta aproximación es aceptada y conocida por el usuario de esta aplicación.

Aunque se ha comentado el hecho de la aproximación de los resultados obtenidos mediante el programa informático, cabe destacar que el uso de estas herramientas incurre en un ahorro económico, ya que no es necesario realizar el ensayo experimental si sólo se necesita conocer un rango aproximado de resultados.



6. Trabajos futuros

Una de las líneas principales de trabajos futuros es la ampliación a otros materiales, geometrías y condiciones. Esto es debido a la gran versatilidad que nos proporciona el programa de análisis mediante elementos finitos DEFORM 2D.

Dentro de la ampliación a otros materiales cabe destacar la biblioteca que nos proporciona la herramienta informática que libraría de hacer ensayos de caracterización de material. Además podemos introducir nuestros resultados de caracterización o incluso modificar los ya existentes.

La geometría para la adaptación del ensayo real al numérico es de gran variedad. Podemos modificar muchos parámetros geométricos, tanto de la chapa como del macho y apoyos. Parámetros geométricos posibles de modificación tenemos el espesor de la chapa, la abertura de la matriz (que está relacionada de forma lineal con el espesor), radio de los apoyos cilíndricos que simulan a la matriz (directamente relacionados con el deslizamiento de la chapa sobre ellos, μ), geometría del macho (con las posibles interferencias entre macho y chapa)...

Otra línea de trabajos futuros está directamente relacionada con las características que nos proporciona la herramienta informática de análisis. Una de las secciones más importantes en este tipo de programas son el mallado y las posibles condiciones de contorno (movimientos y fijaciones). El mallado está directamente relacionado con el tiempo de cálculo. Dentro de las condiciones de contorno, en el plegado tenemos que el movimiento de la chapa está subordinado por el movimiento del macho y el movimiento nulo de los apoyos, por tanto un posible trabajo a realizar sería la modificación de movimientos, tanto en valor como en dirección y sus resultados sobre la placa plegada.

Otra posible línea de acción sería la modificación de las condiciones iniciales de estudio, como la simetría. Se podría analizar la asimetría del eje de descenso del macho con respecto a los apoyos y la consecuente asimetría en el plegado (comportamiento de la recuperación, estudio de las distintas componentes de fuerza, deslizamiento en los apoyos, variación de la distribución del mallado fino,...)

Por tanto, cabe destacar un amplio rango de acción en posibles líneas futuras.



7. Bibliografía

Por tanto, cabe

[1] Espinosa Escudero, M^a del Mar; “Introducción a los procesos de fabricación”, Universidad Nacional de Educación a distancia (2000)

[2] Miguélez M.H.; Cantero J.L.; Canteli J.A.; Filippone J.G.; “Problemas resueltos de Tecnología de Fabricación”, Thomson (2005)

[3] Apuntes de la asignatura de Tecnología Mecánica

[4] Blanco, Julio; “Prensas y procesos en matricería: corte fino, robótica y sistemas de seguridad”, Prensa XXI (1982)

[5] Kalpakjian S.; “Manufacturing Processes for Engineering Materials”, Addison-Wesley Publishing Company, Inc (1992)

[6] William D. Callister, Jr.; “Ciencia e ingeniería de los materiales” Department of Materials Science and Engineering. The University of Utah. Reverté (1995)

[7] James F.Shackelford- Alfredo Güemes; “Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros”. Prentice Hall (1998)

[8] Mikell P. Groover; “Fundamentals of modern manufacturing. Materials, processes and systems”, Ed Prentice Hall (1996)

[9] Gabrielle di Caprio; “Los aceros inoxidables” 2^a edición (1997). Grupinox (Agrupación de empresas para la comercialización y servicio de aceros inoxidables)

[10] Gere, James M.; “Mecánica de materiales”, International Thomson Editors (1998)

[11] Elkins K.L; Sturges R.H; “Springback análisis and control in small radius air bending”, J. of manufacturing Science and Engineering (1999)

[12] Huang Y.M.; Leu D.K ; “Effects of process variables on V-die bending process of steel sheet”, Int. J. of Mechanical Science (1998)

[13] Martínez M.A.; “Consideraciones sobre el cizallado y el plegado en frío de chapa metálica”, Deformación Metálica (1993)

[14] Manuales DEFORM2D



[15] <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/Articulo.asp?A=10300>

[16] <http://212.8.123.31/NASApp/eceafm/F?L=1&P=aMA&R=82672003&S=56742001&N=76062003>

[17] <http://www.puma-systems.eu/plegadora%20PPH.htm>

[18] <http://www.mecos.es>

[19] http://www.mecos.es/productos/utillaje_plegadora/punzones_amada-promecam-mebusa.html

[20] <http://www.lami-nova.net/prensas.htm>

[21] <http://www.puma-systems.eu/plegadora%20PPH.htm>

[22] http://www.baykal.com.tr/SP/urun1_2.html

[23] <http://www.miliarium.com/Paginas/Normas/UNE/EnsayosMateriales.asp>

[24] <http://www.metalunivers.com/Tecnica/Hemeroteca/ArticuloCompleto.asp?ID=17077>